



**Análisis de Variables Ecohidrológicas e Hidráulicas en  
la Implementación de Metodologías para Determinar  
Caudales Ambientales en Ecosistemas de Alta Montaña  
y Páramo**

**Diego Fernando Moreno Pérez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia  
2020

# **Análisis de Variables Ecohidrológicas e Hidráulicas en la Implementación de Metodologías para Determinar Caudales Ambientales en Ecosistemas de Alta Montaña y Páramo**

**Diego Fernando Moreno Pérez**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Magister en Ingeniería Agrícolas**

Director:

(M.Sc. Ing. Agrícola) Miguel Angel Valenzuela Mahecha

Línea de Investigación:

Adecuación de Tierras y Manejo Sostenible

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Desarrollo y Producción Agraria Sostenible

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2020

*A mis padres, por el amor y apoyo que me han  
dado toda la vida, ustedes me empujan a ser mejor  
día y día y quiero verlos felices*

## **Agradecimientos**

Quiero agradecerle a mi director de tesis Miguel Ángel Valenzuela Mahecha por su apoyo, paciencia y acertadas recomendaciones, también deseo expresar mis agradecimientos al grupo de investigación en Manejo Integrado de Ecosistemas y Biodiversidad (XIUA-Uptc) por su apoyo en campo y laboratorio, a mi amigo Camilo Andrés Rojas Cruz por su aporte en el primer capítulo de mi libro, y finalmente quiero darle especial agradecimiento a la Gobernación de Boyacá por financiar mis estudios de maestría.



## Resumen

Se analizaron variables hidrológicas, hidráulicas y ecosistémicas usadas en metodologías para determinar caudales ambientales con el fin de establecer su importancia en ecosistemas de páramos y alta montaña. El estudio se llevó a cabo en la cuenca la chorrera ubicada entre los municipios de Toca y Tuta en el departamento de Boyaca (Colombia), tomando la información en dos periodos de tiempo, época seca y época de lluvias. Se evaluó la funcionalidad ecológica usando como indicador comunidades de macroinvertebrados, se analizaron los servicios ambientales hídricos que ofrece la cuenca dando enfoque a la calidad de agua en función de las necesidades ecosistémicas y de los usos actuales y potenciales. Se usaron métodos estadísticos multivariadas para determinar las relaciones entre las variables estudiadas y finalmente se propuso una aproximación de caudales ambientales para años neutro y con periodos de variabilidad climática. El régimen de caudales de la cuenca presentó un comportamiento bimodal, se observaron diferencias significativas de las variables muestreadas entre épocas de muestreo, y se encontraron asociaciones importantes entre las variables hidráulicas, calidad del agua y de población de macroinvertebrados.

**Palabras calves:** Caudales Ambientales, Calidad de Agua, servicios ambientales, Curvas de idoneidad de hábitat, Macroinvertebrados, métodos multivariados.

## Abstract

Hydrological, hydraulic and ecosystem variables used in methodologies to determine environmental flows were analyzed in order to establish their importance in páramo and high mountain ecosystems. The study was carried out in La Chorrera basin located between the municipalities of Toca and Tuta in the department of Boyacá (Colombia), taking the information in two time periods, dry season and rainy season. The ecological functionality was evaluated using macroinvertebrate communities as an indicator, the water environmental services offered by the basin were analyzed, focusing on water quality based on ecosystem needs and current and potential uses. Multivariate statistical methods were used to determine the relationships between the variables studied and finally an approximation of environmental flows for neutral years and with periods of climatic variability was proposed. The flow regime of the basin presented a bimodal behavior, significant differences were observed in the variables sampled between sampling times, and important associations were found between the hydraulic variables, water quality and macroinvertebrate population.

**Keywords:** Environmental Flows, Water Quality, environmental services, Habitat suitability curves, Macroinvertebrates, multivariate methods.

# Contenido

	Pág.
Resumen.....	I
Lista de figuras .....	V
Lista de tablas.....	IX
<b>1. Objetivos.....</b>	<b>3</b>
1.1 General .....	3
1.2 Específicos.....	3
<b>2. Justificación .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Marco Teórico.....</b>	<b>6</b>
<b>4. Estado del Arte .....</b>	<b>9</b>
4.1 Metodologías Hidrológicas. ....	9
4.1.1 Método Montana:.....	10
4.1.2 Método de Flujo Base Acuático o Nueva Inglaterra .....	10
4.1.3 Método de Northern Great Plains Resource Program (NGPRP)- (Q90).....	11
4.1.4 Método Hoppe .....	12
4.1.5 Método 7Q10.....	13
4.1.6 Método de Texas.....	13
4.1.7 Método de Caudal base.....	14
4.1.8 Método de Arkansas.....	14
4.1.9 Norma Francesa .....	15
4.1.10 Norma Suiza.....	15
4.1.11 Método de Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA) .....	16
4.1.12 Método de Rangos de Variabilidad. ....	17
4.1.13 Método Asturiano.....	18
4.1.14 Método Navarro .....	19
4.1.15 Método de Matthey .....	19
4.2 Metodologías de clasificación hidráulica.....	20
4.2.1 Método del perímetro mojado .....	20
4.2.2 Método de múltiples transectos .....	21
4.2.3 Método de Colorado de la región 2 de U.S.F.W.S. ....	21
4.2.4 Método de Idaho.....	21
4.2.5 Método de la región 4 U.S.F.W.S .....	22

4.2.6	Método de Washington .....	22
4.3	Metodologías de simulación de hábitat .....	23
4.3.1	The Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)- PHABSIM (Physical HABitat SIMulation) .....	23
4.4	metodologías holísticas .....	24
4.4.1	Método de Building Block - Aproximación Bottom-up .....	25
4.4.2	Benchmarking - Aproximación Topdown .....	25
4.4.3	Método de enlace BBM /Modelo Reserva de Escritorio.....	26
4.4.4	DRIFT (Downstream Response to Imposed Flow Transformations) .....	28
4.4.5	ELOHA- Ecological Limits of Hydrologic Alteration.....	29
4.4.6	Método para Estimar Caudal Ambiental en Proyectos Licenciados (Mads), Colombia .....	30
4.4.7	Guía Metodológica Para La Estimación Del Caudal Ambiental- MADS Colombia .....	30
4.4.8	Metodologías combinadas y otros enfoques .....	31
4.4.9	Estudios Realizado en Colombia para determinar caudales ambientales .....	32
<b>5.</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>34</b>
5.1	Área de Estudio .....	34
5.2	Caracterización de la Cuenca .....	35
5.3	Caracterización del Régimen de Caudales .....	35
5.4	Evaluación de la Funcionalidad Ecológica .....	36
5.5	Servicios Ambientales Hídricos .....	38
5.6	Análisis Calidad de Agua .....	38
5.7	Análisis Multivariados .....	38
5.8	Caudales Ambientales .....	39
<b>6.</b>	<b>Resultados y Análisis .....</b>	<b>40</b>
6.1	Caracterización de la Cuenca .....	40
6.1.1	Delimitación del área de estudio. ....	40
6.1.2	Morfometría de la Cuenca .....	42
6.1.3	Coberturas Vegetales de la Cuenca .....	46
6.1.4	Suelos de la Cuenca .....	47
6.2	Caracterización del Régimen de Caudales .....	48
6.2.1	Modelación hidrológica .....	55
6.3	Funcionalidad Ecológica .....	58
6.3.1	Curvas de Idoneidad de Hábitat .....	61
6.4	Servicios Ambientales Hídricos. ....	74
6.5	Calidad de Agua .....	75
6.6	Análisis Multivariado .....	95
6.6.1	Análisis de Correspondencia Canónica .....	95
6.6.2	Análisis de Correspondencia Multiple .....	99
6.6.3	Análisis de Componentes Principales .....	100
6.7	Caudales Ambientales .....	101
<b>7.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>116</b>
<b>8.</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>118</b>
<b>9.</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>119</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 5-1:</b> Diagrama Metodología -----	34
<b>Figura 6-1:</b> Ubicación de la microcuenca del rio Chorrera. -----	40
<b>Figura 6-2:</b> Unidad hidrográfica de la cuenca la chorrera. -----	41
<b>Figura 6-3:</b> A) cambios en área por alturas de la Chorrera B) Modelo de elevación Digital de la Chorrera -----	43
<b>Figura 6-4:</b> Curva Hipsométrica de la Chorrera.-----	43
<b>Figura 6-5:</b> Perfil de elevación del cauce principal en la cuenca la Chorrera.-----	44
<b>Figura 6-6:</b> Orden de la red de drenaje en la cuenca La Chorrera.-----	45
<b>Figura 6-7:</b> Coberturas Vegetales de la Chorrera-----	46
<b>Figura 6-8:</b> Suelos de la Microcuenca la Chorrera.-----	48
<b>Figura 6-9:</b> Ubicación de la estación Limnimétrica LA CHORRERA.-----	49
<b>Figura 6-10:</b> serie de caudales registrados por la estación LA CHORRERA-----	49
<b>Figura 6-11:</b> caudales promedio diarios/mes y Precipitaciones promedios diarios/mes--	50
<b>Figura 6-12:</b> Caudales en épocas niño, niña y neutrales en la estación LA CHORRERA.-----	52
<b>Figura 6-13:</b> Caudal promedio multianual – Estación LA CHORRERA. -----	52
<b>Figura 6-14:</b> Caudales promedios mensuales estación la Chorrera. -----	53
<b>Figura 6-15:</b> Caudales mínimos promedios para épocas niño, niña y neutrales.-----	53
<b>Figura 6-16:</b> caudales máximos promedios para épocas niño, niña y neutrales.-----	54
<b>Figura 6-17:</b> ubicación espacial de las estaciones usadas en la modelación hidrológica.-----	55
<b>Figura 6-18:</b> caudales observados vs caudales modelados-----	57
<b>Figura 6-19:</b> ubicación de los transectos de muestreo.-----	58
<b>Figura 6-20:</b> Graficas de caja y bigote para riqueza, Índice de diversidad (Shannon) e Índice de dominancia (Simpson) en época seca y húmeda. -----	60
<b>Figura 6-21:</b> Graficas de caja y bigote para Velocidad, Caudal y profundidad en época seca y húmeda. -----	63
<b>Figura 6-22:</b> Correlación entre variables físico-químicas y bióticas.-----	65
<b>Figura 6-23:</b> Correlación entre la subclase Oligochaeta y las variables Físico-químicas del agua.-----	66
<b>Figura 6-24:</b> Correlación entre la familia Ceratopogonidae y las variables Físico-químicas del agua.-----	67
<b>Figura 6-25:</b> Correlación entre la familia Chironomide y las variables Físico-químicas del agua.-----	68
<b>Figura 6-26:</b> Correlación entre el orden Oribatida y las variables Físico-químicas del agua.-----	69
<b>Figura 6-27:</b> Correlación entre la subclase Acari y las variables Físico-químicas del agua.-----	69
<b>Figura 6-28:</b> Curvas de idoneidad de hábitat para la Subclase Oligochaeta. -----	70
<b>Figura 6-29:</b> Curvas de idoneidad de hábitat para la familia Ceratopogonidae. -----	71
<b>Figura 6-30:</b> Curvas de idoneidad de hábitat para el orden Oriobatida. -----	72

<b>Figura 6-31:</b> Curvas de idoneidad de hábitat para la subclase Acarí. -----	73
<b>Figura 6-32:</b> Curvas de idoneidad de hábitat para Riqueza en todo el muestreo. -----	73
<b>Figura 6-33:</b> Reservorios y fragmentación predial presente en la cuenca la Chorrera.--	74
<b>Figura 6-34:</b> Curva de duración de caudales microcuenca la chorrera-----	75
<b>Figura 6-35:</b> Ubicación de los puntos muestreados por uso de suelo en la microcuenca la Chorrera. -----	76
<b>Figura 6-36:</b> calidad de agua en los puntos muestreados para época húmeda y seca--	77
<b>Figura 6-37:</b> Demanda Química de Oxígeno por época en los puntos muestreados.----	77
<b>Figura 6-38:</b> Cambios espaciales de la DQO y de su carga contaminante.-----	78
<b>Figura 6-39:</b> Carga contaminante de Demanda Química de Oxígeno por época en los puntos muestreados. -----	79
<b>Figura 6-40:</b> Demanda Biológica de Oxígeno por época en los puntos muestreados. --	79
<b>Figura 6-41:</b> Cambios espaciales de la DBO y de su carga contaminante.-----	80
<b>Figura 6-42:</b> Carga Contaminante de Demanda Química de Oxígeno por época en los puntos muestreados. -----	81
<b>Figura 6-43:</b> Solidos Suspendidos Totales por época en los puntos muestreados. -----	81
<b>Figura 6-44:</b> Cambios espaciales de los sólidos suspendidos totales y de su carga contaminante. -----	82
<b>Figura 6-45:</b> Carga contaminante de Solidos Suspendidos Totales por época en los puntos muestreados. -----	84
<b>Figura 6-46:</b> Nitrógeno Total por época en los puntos muestreados. -----	84
<b>Figura 6-47:</b> Cambios espaciales de los Nitrógeno total y de su carga contaminante. --	85
<b>Figura 6-48:</b> Carga contaminante de Nitrógeno Total por época en los puntos muestreados. -----	86
<b>Figura 6-49:</b> Fosforo Total por época en los puntos muestreados.-----	86
<b>Figura 6-50:</b> Carga contaminante de Fosforo Total por época en los puntos muestreados. -----	87
<b>Figura 6-51:</b> Coliformes Totales por época en los puntos muestreados. -----	87
<b>Figura 6-52:</b> Cambios espaciales de Coliformes Totales y de su carga contaminante. -	88
<b>Figura 6-53:</b> Carga contaminante de Coliformes Totales por época en los puntos muestreados. -----	89
<b>Figura 6-54:</b> Escherichia Coli por época en los puntos muestreados. -----	89
<b>Figura 6-55:</b> carga contaminante de Escherichia Coli por época en los puntos muestreados. -----	90
<b>Figura 6-56:</b> pH del agua por época en los puntos muestreados. -----	90
<b>Figura 6-57:</b> Conductividad Eléctrica del agua por época en los puntos muestreados. -	91
<b>Figura 6-58:</b> Cambios espaciales de Conductividad Eléctrica y de su carga contaminante. -----	92
<b>Figura 6-59:</b> carga contaminante de Conductividad Eléctrica por época en los puntos muestreados. -----	91
<b>Figura 6-60:</b> Temperatura por época en los puntos muestreados. -----	93
<b>Figura 6-61:</b> Análisis Canónico de Correspondencias entre variables hidraulicas y taxas en zona de páramo de la microcuenca la Chorrera-----	96

<b>Figura 6-62:</b> Análisis Canónico de Correspondencias entre variables Fisico-Químicas y taxas en zona de páramo de la microcuenca la Chorrera -----	96
<b>Figura 6-63:</b> Análisis Canónico de Correspondencias entre variables hidráulicas y taxas en zona de Transición a páramo de la microcuenca la Chorrera -----	97
<b>Figura 6-64:</b> Análisis Canónico de Correspondencias entre variables Fisico-Químicas y taxas en zona de Transición a páramo de la microcuenca la Chorrera -----	98
<b>Figura 6-65:</b> Análisis Canónico de Correspondencias entre variables hidráulicas y taxas en zona de agricultura de la microcuenca la Chorrera -----	98
<b>Figura 6-66:</b> Análisis Canónico de Correspondencias entre variables Fisico-Químicas y taxas en zona de agricultura de la microcuenca la Chorrera-----	99
<b>Figura 6-67:</b> Analisis de Correspondencia Multiple -----	100
<b>Figura 6-68:</b> Grafica de componentes principales entre taxas y variables físicas, químicas e hidráulicas. -----	101
<b>Figura 6-69:</b> ubicación puntos según su grado de conservación. -----	102
<b>Figura 6-70:</b> Caudales ambientales propuestos con la metodología Q90 para zona de páramo. -----	102
<b>Figura 6-71:</b> Caudales ambientales propuestos con la metodología Q90 para zona de transición entre páramo y agricultura. -----	103
<b>Figura 6-72:</b> Caudales ambientales propuestos con la metodología Q90 para zona de agricultura. -----	104
<b>Figura 6-73:</b> Régimen de Caudales promedio diarios/mes para fenómeno del niño en zona de Páramo de la Microcuenca la Chorrera. -----	106
<b>Figura 6-74:</b> Régimen Caudales promedio diarios/mes para época neutra en zona de Páramo de la Microcuenca la Chorrera. -----	107
<b>Figura 6-75:</b> Caudales concesionados menos caudales promedios en época neutral y niño para zona de páramo.-----	108
<b>Figura 6-76:</b> curva de idoneidad de hábitat de Velocidad (m/s) para riqueza de macroinvertebrados en zona de páramo-----	108
<b>Figura 6-77:</b> Régimen de caudales promedio diarios/mes para fenómeno del niño en zona de transición entre Páramo y agricultura en la Microcuenca la Chorrera. -----	109
<b>Figura 6-78:</b> Régimen de Caudales promedio diarios/mes para época neutra en zona de transición entre Páramo y agricultura en la Microcuenca la Chorrera.-----	110
<b>Figura 6-79:</b> Caudales concesionados menos caudales promedios en época neutral y niño para zona de transición entre páramo y agricultura.-----	111
<b>Figura 6-80:</b> curva de idoneidad de hábitat de Profundidad (cm) para riqueza de macroinvertebrados en zona de transición entre páramo y zonas agropecuarias -----	112
<b>Figura 6-81:</b> Régimen de Caudales promedio diarios/mes para época niño en zona de agricultura en la Microcuenca la Chorrera. -----	112
<b>Figura 6-82:</b> Régimen de Caudales promedio diarios/mes para época neutra en zona de agricultura en la Microcuenca la Chorrera. -----	113
<b>Figura 6-83:</b> Caudales concesionados menos caudales promedios en época neutral y niño para zona de Agricultura.-----	114
<b>Figura 6-84:</b> curvas de idoneidad de hábitat de Profundidad (cm) y caudal (L/s) para riqueza de macroinvertebrados en zona de agricultura. -----	114

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 3-1:</b> términos y conceptos de “Caudal Ambiental” -----	7
<b>Tabla 4-1:</b> Marco propuesto para establecer los objetivos de calidad de los recursos ecológicos sobre la base de un sistema de clasificación (DWAF, 1999) -----	26
<b>Tabla 4-2:</b> Revisión de estudios realizados en Colombia para determinar caudales ambientales -----	32
<b>Tabla 6-1:</b> Valores de la curva hipsométrica en la Chorrera. -----	44
<b>Tabla 6-2:</b> Resumen de la morfometría de la Chorrera -----	46
<b>Tabla 6-3:</b> área de las coberturas vegetales en la Chorrera. -----	47
<b>Tabla 6-4:</b> áreas de las Unidades Cartográficas de Suelos en la Chorrera. -----	47
<b>Tabla 6-5:</b> Índice Oceánico El Niño (Oceanic Niño Index, ONI) -----	51
<b>Tabla 6-6:</b> Caudales mínimos y máximos para época niño, niña y neutrales. -----	54
<b>Tabla 6-7:</b> Estaciones Hidrometereológicas usadas en la modelación hidrológica. -----	55
<b>Tabla 6-8:</b> Parámetros calibrados con SWATCUP -----	56
<b>Tabla 6-9:</b> Funciones objetivos de la calibración con SWATCUP. -----	57
<b>Tabla 6-10:</b> prueba de normalidad Shapiro Wilk en variables hidráulicas e índices de diversidad y riqueza -----	59
<b>Tabla 6-11:</b> pruebas estadísticas de diferencias significativas entre época húmeda y seca para variables hidráulicas e índices de diversidad y riqueza -----	59
<b>Tabla 6-12:</b> Prueba de normalidad Shapiro Wilk para variables Físico-químicas y microbiológicas. -----	62
<b>Tabla 6-13:</b> Valores promedios de las variables físico-químicas en los sitios muestreados en la Chorrera. -----	65
<b>Tabla 6-14:</b> codigos propuestos para taxas de macroinvertebrados -----	95
<b>Tabla 6-15:</b> Caudales ambientales propuestos con la metodología Q90 por punto muestreado en zona de páramo. -----	103
<b>Tabla 6-16:</b> Caudales ambientales propuestos con la metodología Q90 por punto muestreado en zona de transición entre páramo y agricultura -----	104
<b>Tabla 6-17:</b> Caudales ambientales propuestos con la metodología Q90 por punto muestreado en zona de agricultura -----	105
<b>Tabla 6-18:</b> Caudales promedio diarios/mes para fenómeno del niño en zona de Páramo de la Microcuenca la Chorrera. -----	106



<b>Tabla 6-19:</b> Caudales promedio diarios/mes para época neutra en zona de Páramo de la Microcuenca la Chorrera. -----	107
<b>Tabla 6-20:</b> Caudales promedio diarios/mes para fenómeno del niño en zona de transición entre Páramo y agricultura en la Microcuenca la Chorrera.-----	109
<b>Tabla 6-21:</b> Caudales promedio diarios/mes para época neutra en zona de transición entre Páramo y agricultura en la Microcuenca la Chorrera. -----	110
<b>Tabla 6-22:</b> Caudales promedio diarios/mes para fenómeno del niño en zona de actividad agropecuaria en la Microcuenca la Chorrera. -----	112
<b>Tabla 6-23:</b> Caudales promedio diarios/mes para época neutral en zona de actividad agropecuaria en la Microcuenca la Chorrera.-----	113

# Introducción

Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, la gestión integral de recurso hídrico (GIRH) busca desarrollar políticas públicas para el manejo del recurso hídrico basándose en el desarrollo económico, social y la protección de los ecosistemas con el objetivo de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales.

Dentro del GIRH se debe tener en cuenta el concepto de caudal ambiental. Este término es referido en varias publicaciones como caudal ecológico (García de Jalón, 2003; SECAB, 2005; Agualimpia y Castro, 2006). Sin embargo, existe una diferencia importante entre los dos, derivada de la diferencia entre los conceptos de ambiente y ecología. El ambiente conforma las relaciones entre la naturaleza y la cultura del ser humano, mientras que la ecología solo considera el estudio de los ecosistemas naturales, aislados de la sociedad (Leff, 2006). A partir de estas definiciones es posible interpretar que en el estudio del caudal ambiental de una corriente se consideran los usos humanos del agua, mientras que al hablar de caudal ecológico se prioriza sobre la naturaleza sin tener en cuenta la importancia del agua como recurso e insumo base en la sociedad.

En respuesta a la necesidad de asegurar prácticas sostenibles y responsables, a nivel mundial se están aplicando técnicas de estimación del régimen de caudal ambiental para ayudar a reducir los impactos sobre los ecosistemas hídricos. Es así como en muchas partes del mundo se trabaja constantemente en establecer o tener una mayor proximidad sobre cuáles son los caudales que deben permanecer en un río después de un aprovechamiento, definiéndolo bajo varios parámetros y manejando diferentes componentes como la hidráulica, la hidrología, la ecología, etc. (Castro et.al, 2006).

Los ecosistemas de páramo se caracterizan por su capacidad de regular el ciclo hídrico y presentar una oferta hídrica alta, pero también por ser muy vulnerables al cambio climático. Como consecuencia se calcula que para los próximos 50 años el volumen de precipitación en amplias zonas de la región caribe y andina decrecerán entre un 15% y 36% (Murcia, 2010). En este sentido una variación de este tipo generará cambios significativos en la estructura y por ende funcionalidad ecológica de cerca del 70% de los páramos y ecosistemas de alta montaña, incidiendo directamente sobre la producción y regulación hídrica de la cual dependen estos ecosistemas y el humano (INAP, 2011).

El 50% de los páramos del mundo se encuentran en Colombia con aproximadamente el 1.3% de su territorio. De este porcentaje el departamento de Boyacá tiene la mayor extensión con el 18.3% del total de páramos del país (MADS, 2002), y según el estudio nacional del agua (ENA, 2018) Los resultados de las estimaciones del Índice de vulnerabilidad hídrica al desabastecimiento – (IVH), que denota el grado de fragilidad de la cuenca hidrográfica para mantener una oferta, sugieren que para condiciones hidrológicas promedio varias cabeceras municipales de Boyacá presentan categoría de vulnerabilidad alta. Esta situación se acentúa para la condición seca, en la cual el IVH llega a ser muy alto en algunas zonas.

Al momento de determinar caudales ambientales en ecosistemas de páramo y alta montaña se hace necesario determinar y analizar las variables hidrológicas, hidráulicas y ecosistémicas más representativas, buscando establecer si estas tienen un impacto relevante en el cálculo de los caudales ambientales en estos ecosistemas. Por lo anterior y partiendo de la vulnerabilidad de los ecosistemas de alta montaña y páramo y de los servicios de regulación y oferta hídrica que estos le ofrecen a la comunidad y a los ecosistemas, es fundamental fomentar y garantizar la gestión integral del caudal ambiental en los ecosistemas de páramo del departamento de Boyacá (Izquierdo & Madroño, 2014), para esto se debe tener en cuenta que los caudales mínimos son por lo general los que mayor impacto tienen sobre las necesidades ecosistémicas y sociales. La metodología propuesta y los resultados obtenidos en la presente investigación, combinadas a futuro con el análisis de frecuencia de flujos extremos mejor conocido como caudales mínimos estadísticos, como por ejemplo metodologías 7Q10 o Q95, permitirán una mejor estimación de caudales ambientales, lo cual es importante al momento de concesionar caudales y el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico en cuencas de alta montaña y páramo.

El presente documento consta de 6 capítulos, en los que se hace una descripción de algunas de las diferentes metodologías usadas históricamente para determinar caudales ambientales y se describe el proceso metodológico de caracterización del régimen de caudales, Evaluación de la funcionalidad ecológica en la red hídrica de la cuenca y el análisis de sus servicios ambientales hídricos, además se describe el uso de técnicas estadísticas multivariadas para procesar los datos que permitieron analizar la importancia de este tipo de estudios en ecosistemas de páramos y alta montaña.

# **1.Objetivos**

## **1.1 General**

- Identificar y analizar variables hidrológicas, hidráulicas y ecosistémicas más representativas en la implementación de metodologías que determinen caudales ambientales en ecosistemas de páramos y alta montaña.

## **1.2 Específicos**

- Determinar las características hidrológicas de la cuenca la Chorrera en función de la variabilidad climática, alteración del régimen y de la implementación de modelos hidrológicos.
- Evaluar la funcionalidad ecológica de los sistemas ecosistémicos en los tramos diagnosticando hábitat, especies representativas e indicadores biológicos.
- Analizar la calidad de agua en los tramos de interés para determinar criterios de calidad en función de las necesidades ecosistémicas y de los usos de suelos actuales y potenciales.
- Estimar los servicios ambientales ofrecidos por la cuenca la chorrera en función del recurso hídrico.
- Determinar caudales ambientales con una metodología hidrológica y con una metodología con enfoque holístico para determinar cuál se ajusta mejor a las condiciones de páramo y alta montaña.
- Implementar métodos estadísticos multivariados para determinar las relaciones de las variables fisicoquímicas y biológicas con los caudales ambientales.

## 2. Justificación

La estimación de caudales ambientales en Colombia debe estar basada en un enfoque ecosistémico y ambiental, en el que de forma integral hagan parte e interactúen los componentes hidrológicos, hidráulico, calidad de agua, ecológico, socioeconómico y legal. Debido a las limitaciones de información existentes, las particularidades de los problemas de contaminación hídrica del país, el desconocimiento del ciclo de vida de la gran variedad de especies existentes en los ecosistemas de agua dulce, los problemas socioeconómicos de una buena parte de las comunidades ribereñas, las limitaciones de las autoridades ambientales y la falta de aplicación de mecanismos de planeación y gestión del territorio entre otros aspectos, la mayoría de los métodos existentes para determinar el caudal ambiental no pueden aplicarse directamente al contexto colombiano (Pinilla et.al, 2014). Por tal motivo el Ministerio de Medio Ambiente Desarrollo Sostenible desarrolló una guía para determinar el caudal ambiental, el cual establece los lineamientos generales y los requisitos mínimos de información necesaria para su estimación en el territorio colombiano.

El departamento de Boyacá es privilegiado al contar con varios ecosistemas de alta montaña y páramo. No obstante, la inadecuada gestión del recurso hídrico amenaza la capacidad de regulación hídrica y los rendimientos hídricos de estos ecosistemas. Sumado al impacto del cambio climático y a la expansión de la frontera agrícola ha conllevado a la necesidad de estudiar con más detalle el comportamiento hidrológico, con miras a planificar y desarrollar estrategias de gestión integrada del recurso hídrico y darle un adecuado uso, manejo y conservación, en donde se consideren no solo la satisfacción de las diferentes necesidades humanas sino, además la conservación de sus características ecológicas, hidráulicas e hidrológicas.

Por lo anterior, es necesario llevar a cabo planes de gestión del recurso hídrico en las cuencas ubicadas en ecosistemas de páramo y alta montaña en el departamento de Boyacá. En este proceso de gestión es fundamental desarrollar herramientas conceptuales y metodológicas adaptadas a las condiciones de páramo, las cuales logren determinar con criterios claros y científicos los caudales ambientales, lo cual permitirá establecer el uso y aprovechamiento del agua para diferentes propósitos; estos incluyen los usos ambientales, el funcionamiento ecológico de los ecosistemas, el suministro de agua para consumo e higiene, la generación hidroeléctrica, el riego agrícola y la recreación, entre otros (pinilla et.al, 2015).

El embalse La Copa se encuentra localizado en la cuenca media del río Chicamocha a 5 kilómetros del municipio de Toca, en el departamento de Boyacá. Al embalse confluyen varias cuencas de las cuales la cuenca del río Chorrera es la segunda más grande, aportando grandes caudales en épocas de lluvias, pero disminuyen su caudal notoriamente durante los períodos secos (Gamboa et.al, 2015). La cuenca se encuentra ubicada entre los municipios de Toca y Tuta y en la zona alta de la cuenca se encuentra parte del páramo La Cortadera perteneciente al complejo de páramos de Tota - Bijagual – Mamapacha.

---

A pesar de que el páramo la cortadera fue declarado como Parque Regional Natural, actualmente la zona de páramo de la cuenca La Chorrera se encuentra desprotegida en gran medida, presenta una fuerte presión antrópica por la actividad agrícola y pecuaria y no se han desarrollado estudios hidrológicos importantes. por lo anterior la presente investigación pretende analizar variables usadas para determinar caudales ambientales en la cuenca del Río La Chorrera con miras a establecer los parámetros claves que se deben tener en cuenta cuando se implementan metodologías para determinar caudales ambientales en estos ecosistemas de páramo y alta montaña, como apoyo a la toma de decisiones en la planificación y gestión del recurso hídrico en cuencas ubicadas en estos ecosistemas.

### 3.Marco Teórico

Entre la década de los sesenta y ochenta en el período de crecimiento económico que siguió a la Segunda Guerra Mundial, Estados Unidos y Europa avanzaron en el desarrollo y manejo de los recursos hídricos, y la tasa de construcción de represas aumentó (WCD, 2000). Esto trajo como consecuencia la necesidad de evaluar los impactos que las presas tenían sobre la salud de los ecosistemas acuáticos (Indij, 2018) y la necesidad de proteger el hábitat de la biota acuática en arroyos y ríos. Para la década de los setenta, en algunas zonas de Estados Unidos se empezó a incluir el deseo de mantener viable la cría y pesca de salmón y trucha en los ríos de montaña debido al interés económico de estas especies, el cual se estaba viendo amenazado por la construcción de presas. Al mismo tiempo, se realizaban leyes para proteger las pesquerías, lo cual evidenciaba la necesidad de cuantificar un caudal que garantizara la salud de los ríos (Milhous, 2017), alentó y amplió el desarrollo y aplicación de varias metodologías para determinar el caudal ambiental que se extendieron a varios países. En muchos países este proceso avanzó hasta la década de 1980 o más tarde como en América Latina, África y Asia (Tharme, 2003). Con este proceso se empezaron a desarrollar los primeros conceptos de caudal ambiental usando criterios profesionales para determinar la cantidad y calidad que requiere el hábitat de la biota acuática (Gore & Petts, 1989).

Existen varias concepciones del caudal mínimo que debería llevar un río, el término más popularizado en el ámbito de la investigación, la academia y la gestión hídrica es el de "caudal ecológico". Sin embargo, varias denominaciones y conceptos que se basan en diferentes aproximaciones que van desde un simple dato cuantitativo para satisfacer un mínimo, pasando por considerar las condiciones mínimas que aseguran el hábitat de los ecosistemas, hasta conceptos que consideran de manera integral el río y la cuenca. En los países de habla inglesa se suele usar el concepto de caudal recomendado o caudal ambiental, y en varios países de habla hispana le se les suele llamar caudal ecológico, de mantenimiento, de compensación, básico, mínimo aconsejable o mínimo entre otros. Casi todos estos conceptos tienen elementos similares, pero denominaciones diferentes dependiendo del interés ambiental que se busque (Cantera et al., 2009);

Algunas definiciones de caudal ambiental buscan mantener las condiciones físico-químicas del agua para mantener la salud de los ecosistemas acuáticos, otras además de esto tienen en cuenta también la dilución de contaminantes, paisajismo y recreación entre otros, y algunos conceptos priorizan el uso doméstico del agua sobre las necesidades ecosistémicas lo cual no es muy recomendable. El concepto de régimen de caudal ambiental debe buscar caudales que mantengan las condiciones en cuanto a cantidad, calidad y regularidad para mantener la salud de los ecosistemas acuáticos que dependen de este. Para determinar este régimen no solo es necesario tener en cuenta las variables físicas, químicas y biológicas si no también las variables sociales de tal manera que haya un equilibrio entre las demandas del ser humano y del ecosistema. Este régimen de caudales ambientales debe incluir además la variabilidad hidrológica intra e interanual,

teniendo en cuenta las crecidas periódicas y los eventos extremos (Cantera et al., 2009). Se pueden diferenciar algunos términos y conceptos presentados en la **Tabla 3-1**.

**Tabla 3-1:** términos y conceptos de “Caudal Ambiental”

Denominación	Concepto
Caudal Ecológico Mínimo	Es el caudal que restringe el uso durante las estaciones de caudales bajo y que mantiene la vida en el río. No aportan una solución ecológica, se calculan de forma directa y arbitraria, producto de un pacto más que de una formulación científica (King et al., 1999), (Palau, 2003).
Caudal Ecológico	Caudal mínimo necesario en una fuente o curso fluvial, para preservar la conservación de los ecosistemas fluviales actuales, en atención a los usos de agua comprometidos, a los requerimientos físicos de la corriente fluvial, para mantener su estabilidad y cumplir sus funciones tales como, dilución de contaminantes, conducción de sólidos, recarga de acuíferos y mantenimientos de las características paisajísticas del medio (Ormazabal, 2004), (APROMA, 2000).
Caudal de Mantenimiento	Régimen de caudal que mantiene todas las funciones ecosistémicas del río, incluyendo la reclutamiento continuo y balanceado de las especies acuáticas y ribereñas. Es un caudal calculado para y dirigido hacia la conservación de los valores bióticos del ecosistema fluvial (King & Louw, 1998), (Antoni Palau., 1994).
Caudal Ambiental	Régimen modificado que se establece en un río, humedal o zona costera para sustentar ecosistemas y sus beneficios donde hay empleos de agua que compiten entre sí y donde los caudales están regulados. El caudal ambiental es usado para valorar cuánta agua puede quitársele al río sin alcanzar un nivel inaceptable de degradación del ecosistema ribereño o, en el caso de ríos gravemente alterados, se considera caudal ambiental a la cantidad de agua necesaria para reestablecer el río y rehabilitar el ecosistema hasta un estado o condición requerida (Dyson et al., 2003), (Jimenez. et al., 2019), (King et al., 1999).
Caudal de Acondicionamiento	Se refiere a un caudal que puede establecerse como complemento de caudales mínimos o de mantenimiento, para una finalidad concreta, ajena a la conservación de valores bióticos del ecosistema fluvial y referida a aspectos abióticos (dilución, paisaje, uso recreativo, etc.)(Palau, 2003).
Caudal de Compensación	Caudal mínimo para asegurar la supervivencia de un ecosistema acuático preestablecido (Espinoza., 1999).
Régimen de Caudales Ambientales	Es aquel que permite cumplir con una condición establecida del ecosistema ribereño. En el se detalla caudales específicos en magnitud, periodicidad, frecuencia y duración, tanto de caudales báseles como de avenidas y crecientes en la escala de variabilidad intra o interanual, todo ello diseñado para mantener en funcionamiento todos los componentes del ecosistema para una condición específica (King et al., 1999).

Fuente: (Cantera et al., 2009)

Al comienzo, el interés en los caudales ambientales se enfocaba en la calidad del agua, pero con el tiempo se fue incluyendo la idea que un río sin agua realmente no era un río y



un río seco no formaba parte de un paisaje natural, excepto en zonas desérticas (Milhous, 2017). Desde entonces se han desarrollado varias metodologías que van desde análisis básicos y caracterización de las series de tiempo de caudales y el análisis de los atributos hidráulicos de la corriente estudiada, donde se usa información existente, hasta metodologías elaboradas que tienen en cuenta las características bióticas y abióticas del ecosistema, las cuales requieren la recopilación tanto de información hidrológica e hidráulica como de información ecológica y el uso de software especializado (Castro et al., 2006).

Las metodologías para la evaluación del caudal ambiental varían en un amplio rango de complejidad y profundidad, según la disponibilidad de datos, la capacidad técnica, el marco temporal, la prioridad del sitio, el nivel de financiamiento o el nivel esperado de controversia. El caudal ambiental puede determinarse desde un solo volumen de caudal anual o un límite de caudal mínimo por debajo del cual no se permiten extracciones, hasta un régimen de caudal integral que especifica la distribución de caudal a lo largo del año. Un estudio exhaustivo podría especificar los caudales necesarios para permitir el paso de los peces, proporcionar suficiente 'espacio vital' para la biota o garantizar niveles aceptables de temperatura, oxígeno disuelto o salinidad y caudales más altos para remover materiales finos o vegetación invasora. La escala espacial de la evaluación de los caudales ambientales también varía ampliamente, desde la totalidad de la cuenca hasta el alcance del río por lo que las metodologías van desde enfoques relativamente simples a nivel de reconocimiento hasta metodologías intensivas en recursos para estudios detallados.

Son variados y numerosos los métodos propuestos en la literatura para la estimación de caudales ambientales los cuales se suelen implementar en corrientes reguladas, ya sea a nivel de cuenca, subcuenca o a escala local (Indij, 2018). Los enfoques más recientes de caudal ambiental plantean la necesidad de mantener un buen estado ecológico, con lo que se recomienda la implementación de métodos adaptativos que brinden la oportunidad de complementar proyectos de restauración y proporcionen el marco necesario para el establecimiento de un equilibrio más equitativo entre los bienes y servicios socioeconómicos y ecológicos (Kozak et al., 2016).

## 4.Estado del Arte

Después de la década de los 80 se fueron desarrollando varias metodologías para evaluar caudales ambientales, lo cual conllevó a la necesidad de clasificarlas en función de varios factores. Arthington y Zalucki (1998) propusieron clasificarlas según: (i) Métodos que abordan los requisitos de flujo para fines geomorfológicos, (ii) Métodos que abordan los requisitos de flujo de humedales, vegetación ribereña y de llanuras de inundación, (iii) Métodos que abordan los requerimientos de flujo de peces; y (iv) Métodos que abordan los requerimientos de flujo de invertebrados acuáticos (Arthington & Zalucki, 1998a).

El enfoque desarrollado en varios países para determinar los caudales ambientales también puede ser dividido en las siguientes cuatro categorías: (i) tabla de referencias, estos métodos requieren pocos recursos una vez desarrollado el procedimiento general, pero no pueden transferirse fácilmente para su uso en lugares diferentes para las que fueron diseñadas, (ii) Análisis de escritorio. Generalmente se enfoca en información hidrológica y/o ecológica existente, (iii) Análisis funcional el cual se basa en la comprensión de la relación que existe entre varios aspectos hidrológicos y ecológicos del sistema hídrico, (iv) Análisis y modelamiento del hábitat hidráulico los cual propone modelos que definen la relaciones funcionales entre el hábitat físico y el caudal del río (Acreman & Dunbar, 2004).

Rebeca Tharme propuso en el 2003 una de las clasificaciones más aceptadas y citadas por investigaciones referentes a caudales ambientales (Redondo, 2011). (Tharme, 2003) revisó 207 metodología registradas para 44 países dentro de seis regiones del mundo; Tharme agrupan las metodologías en: Metodologías Hidrológicas, Metodologías de Clasificación Hidráulica, Metodologías de Simulación de Hábitat y Metodologías Holísticas, con dos categorías más que representan combinaciones de las anteriores o con otros enfoques, por lo anterior la presente revisión clasifica las metodologías más relevantes en las categorías propuestas por Tharme, en el 2003 (Gordon et al., 2004), (Castro et al., 2006), (Saniruzzaman et al., 2015), (Hirji & Davis, 2009), (Linnansaari et al., 2013), (Hao et al., 2016), (N. L. R. Poff et al., 2017), (Wang et al., 2016), (Gopal, 2013), (Jayasiri et al., 2017), (Wahono et al., 2014), (Mazvimavi et al., 2007), (King & Louw, 1998), (Sabaj et al., 2014), (Ahmadi-Nedushan et al., 2006), (Karimi et al., 2014), (Arthington et al., 2004), (NRC, 2005), (Consuegra, 2013), (Opperman et al., 2018), (Jackie et al., 2006), (Chávez & González, 2015), (Pinilla et al., 2014), (Redondo, 2011) (Agualimpia & Castro, 2006), (Castro et al., 2006), (Jowett, 1997), (Eslamian & Eslamian, 2016), (Arthington & Zalucki, 1998b), (Cantera et al., 2009).

### 4.1 Metodologías Hidrológicas.

Estas categorías agrupan las metodologías que se enfocan en obtener un caudal mínimo usando únicamente el análisis del régimen de caudales registrados o estimados de los

ríos. Debido a que las especies acuáticas se han adaptado a los regímenes de caudal, estas metodologías se basan en la relación que existe entre el régimen hidrológico y el ecosistema presente usando reglas simples basadas en la duración del caudal.

Las ventajas de estos métodos son de fácil, rápida y económica aplicación, además de requerir solo series temporales de caudal, pero también tiene importantes desventajas como no tener en cuenta los aspectos biológicos y geomorfológicos del río, y en algunos casos establecen un caudal único e invariable en el tiempo. Debido a ello, estas metodologías no reflejan las necesidades de todos sectores interesados en determinar el caudal ambiental (Castro et al., 2006). Algunos métodos propios de esta metodología son:

#### **4.1.1 Método Montana:**

También conocido como método Tennant fue propuesto por Tennant en 1976 (Tennant, 1976) y es uno de los métodos más usados. En este método se asume que para mantener la salud del río es necesario cierto porcentaje de flujo. Tennant analizó 11 ríos donde observó que el ancho de la corriente, la velocidad y la profundidad del agua aumentaron rápidamente en el primer 10% de flujo, y la tasa de incremento disminuyó con flujos superiores al 10%. Tennant consideró que la velocidad y profundidad del agua permitiría solo por un corto plazo la supervivencia de la vida acuática cuando el flujo fuera inferior al 10% del promedio anual de caudales. El autor también describe que con flujos superiores al 30% del promedio anual de caudales se proporciona el ancho, velocidad y profundidad necesaria para un régimen de flujo base (Tennant, 1976). Fraser (1978) sugiere que este método puede ser aplicado incorporando la variación estacional y determinando los caudales mínimos mensuales como un porcentaje de los flujos medios mensuales (Jowett, 1997).

Una de las principales desventajas de este método es que la corriente donde sea usado debería tener características morfológicas similares a aquellas para las cuales se desarrolló el método. Sin embargo, Tennant no proporciona los criterios requeridos. Además, este método no tiene en cuenta variaciones diarias estacionales o anuales (Gordon et al., 2004), Según (Agualimpia & Castro, 2006). Este método funciona bien para planeación regional y aprovechamiento local y se recomienda ser aplicado para diferentes porcentajes de flujo (10%, 30% y 60%) en periodos secos y húmedos.

#### **4.1.2 Método de Flujo Base Acuático o Nueva Inglaterra**

El método del Flujo Base Acuático (Average Base Flow Method - ABF), fue desarrollado en 1981 por el Servicio de Pesca y Fauna de los Estados Unidos- USFWS (U.S. Fish and Wildlife Service). El ABF propone que para cursos de agua naturales donde exista un mínimo de 25 años de registros de caudales, se tomará como caudal ambiental el caudal promedio de agosto (promedio multianual de los caudales medios de agosto). Este caudal produce la condición de mayor tensión metabólica para los organismos acuáticos debido

a las altas temperaturas del agua y la disminución del espacio vital, el oxígeno disuelto y el suministro de alimentos. Según el (USFWS, 1981), la flora y fauna de un ecosistema acuático han evolucionado para sobrevivir a estas adversidades periódicas sin grandes cambios en las poblaciones. El USFWS asume que el ABF será adecuado durante todo el año, a menos que sea necesario liberar flujos adicionales para favorecer el desove e incubación de peces. Esto equivale a liberar los flujos medianos históricos durante el periodo de desove.

Para ríos donde no existan suficientes registros de caudal, para ríos regulados por represas o por desviaciones del río en la parte alta, la USWFS recomienda un caudal de  $0.095 \text{ m}^3/\text{s}$  por  $\text{Km}^2$  de drenaje para todas las épocas del año, a menos que sea necesario liberar flujo para el desove e incubación de especies acuáticas, para lo cual se recomienda  $0.19 \text{ m}^3/\text{s}$  por  $\text{Km}^2$  para otoño-invierno y  $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$  por  $\text{Km}^2$  para primavera (USFWS, 1981).

El ABF es un método de fácil aplicación, pero a pesar de que las comunidades acuáticas han evolucionado para sobrevivir a condiciones críticas de estiaje, estas comunidades no resisten por mucho tiempo esta condición. Las especies acuáticas se han adaptado las fluctuaciones anuales con crecidas, épocas con un caudal mínimo y otras con avenida, etc., por lo tanto mantener un caudal que representa la condición más crítica para una comunidad acuática durante todo el año podría traer graves alteraciones en el ecosistema fluvial (Castro et al., 2006).

#### **4.1.3 Método de Northern Great Plains Resource Program (NGPRP)- (Q90)**

El Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos (FWSUS), desarrolló en 1974 un esquema de recomendación de caudales para la aplicación en arroyos del área de las Grandes Llanuras del Norte (Northern Great Plains) donde había presencia de salmones y se necesita tener este esquema en cuenta las épocas de desove e incubación. Este método se detalla en un informe del Subgrupo de Necesidades de Caudal, Grupo de Trabajo(C) Agua, para el Programa de Recursos de la Gran Llanura del Norte. Este procedimiento se basó primero en estimaciones de las necesidades de caudal de la corriente relacionadas con las condiciones hidrológicas promedio para cada mes específico, y en segundo lugar, en la estimación de las necesidades de caudal para periodos extremadamente secos. Para proponer este método se involucraron cuatro pasos sucesivos para determinar los caudales recomendados que se describen a continuación:

- 1) Se reunieron todos los datos de caudal disponibles para las corrientes bajo consideración y se separó la información por mes calendario, seguidamente se calculó la descarga media de cada mes. Cuando era evidente una distribución normal de los datos de caudal (durante años) se utilizó la prueba estadística "t" para establecer un límite superior e inferior para los valores mensuales medios, de las pruebas iniciales en varios

tramos de la corriente (relativamente estable a lo largo de los años). Se encontró que el 70 por ciento de los flujos anuales durante un mes determinado se agruparon alrededor de la media y se consideran representativos de las condiciones hidrológicas promedio. El 30 por ciento de los flujos registrados que se encuentran fuera del rango se eliminaron y se supone que representan flujos anormalmente altos y bajos. Cuando no era evidente una distribución normal de los datos de caudal, se eliminaron arbitrariamente los valores anormalmente altos y / o bajos.

2) Se organizaron de mayor a menor los valores diarios restantes para un mes en particular para todos los años de registro, Esto dio como resultado una curva de duración del flujo para el mes en cuestión. Este proceso se repite para cada mes del año. El caudal recomendado se estableció en un caudal superior al 90 por ciento del tiempo determinado a partir de las curvas de duración del flujo para cada mes del año. Este flujo se conoce como el flujo del percentil 10. Esta técnica resultó en una serie de estimaciones de flujo mensual.

3) Se dividió la corriente en secciones basadas en los afluentes que ingresan, o desviaciones que salen. El tramo que se examina y las adiciones o sustracciones del flujo del percentil 10 se realizaron de acuerdo con el volumen de caudal en los afluentes y / o desviaciones.

4) Se hicieron ajustes al alza para los tiempos de desove, para el período de escorrentía de primavera (mayo, junio y julio, cuando se recomendó el flujo medio anual de registro), y para facilitar la operación del flujo.

Este método no se usó para aquellos tramos de corrientes que exhibieron flujos diarios medios extremadamente erráticos de los meses examinados. En esos casos, los juicios se utilizaron para eliminar ciertos registros diarios extremadamente bajos y / o altos. Este método asume que el percentil 90 de años normales proporciona las condiciones para que el hábitat de las comunidades acuáticas no se vea afectadas, por lo que se recomienda eliminar del análisis los eventos de extremos (meses de flujo bajo y de flujo alto) que por lo general son de corta duración (Díez, 2005), (Díez & Sanz, 2008), (Agualimpia & Castro, 2006)

#### **4.1.4 Método Hoppe**

También llamado el método regional de la regla empírica de Hoppe, fue publicado por Hoppe (1975) y se basa en la curva de duración de caudales medios diarios y en las épocas del ciclo de vida de especies salmonícolas. Este método es uno de los primeros en tener en cuenta los procesos biológicos de las corrientes y su relación con la curva de duración de caudales (CDC). El método fue desarrollado para su uso en el río Fryingpan en el oeste de Colorado (Estados Unidos), pero también se utilizó con éxito en la Región de las Montañas Rocosas (WWDC, 1985). En este método se recomienda un caudal igualado o superado el 17% del tiempo (percentil 17) en un periodo de descarga de 48 horas. Para la etapa de desove se debe proporcionar un caudal igualado o superado el 40% del tiempo

(percentil 40) y para el resto del año se recomienda un caudal de producción de alimentos y crecimiento igual al caudal igualado o superado el 80% (percentil 80) (WWDC, 1985), (Aqualimpia & Castro, 2006) Y (Redondo, 2011)..

#### **4.1.5 Método 7Q10**

El método 7Q10 fue desarrollado para arroyos de Pennsylvania (Chiang & Johnson, 1976). Este método utiliza un rendimiento constante para determinar el caudal ecológico y se basa en los caudales mínimos diarios. El 7Q10 propone que el caudal ecológico sea el caudal mínimo promedio que persiste durante siete días consecutivos con un periodo de retorno de diez años (Loar & Sale, 1981). Este método es una variación de un método muy similar denominado 7Q2, el cual usa el mismo criterio (caudal mínimo que persiste durante siete días, con un periodo de retorno de dos años) (Aqualimpia & Castro, 2006).

Debido a que es poco común tener disponible los caudales medios mínimos diarios (MAVDT, 2013) recomienda usar los caudales medios diarios. Para calcular el 7Q10 se debe determinar el promedio móvil en una ventana de 7 días (caudal promedio semanal). con los registros mínimos semanales de cada año se construye la serie anual de excedencia; estos valores mínimos anuales se ajustan a una función de probabilidad y se determina el percentil 10 de la distribución usada. (Redondo, 2011) recomienda usar la distribución Log-Pearson Tipo III.

#### **4.1.6 Método de Texas**

En Texas existen dos métodos hidrológicos para definir los requisitos de caudal mínimo; el método Lyon para permisos de agua y el método del Criterio de Consenso para necesidades de caudal ambiental (Consensus Criteria for Environmental Flow Needs-CCEFN) para planificación de agua.

El método de Lyons fue desarrollado por Bounds et al., (1979) y se basa en los caudales propuestos por Tennant (1976) y en el trabajo de Robinson (1969) quien propone el uso de flujos mensuales promedios considerando la variaciones estacionales naturales (Palmer & Snyder, 1985), (Karim et al., 1995). Para determinar los caudales ecológicos en las corrientes de Texas este enfoque usa porcentajes del promedio de caudales diarios y recomienda que el caudal ecológico sea el 40% del caudal medio mensual de octubre a febrero; y el 60% de la caudal medio mensual de marzo a septiembre para proporcionar más caudal durante los meses críticos de primavera y verano. Bounds et al. (1979) determinaron los porcentajes del 40% y 60% usando la relación del perímetro húmedo del río, es decir, la cantidad de lecho de río y banca que son mojadas con el caudal ecológico. Al 60% del caudal medio mensual, más del 80 por ciento del sustrato del río se humedeció, pero por debajo del 40% del flujo medio mensual el porcentaje de sustrato humedecido comenzó a disminuir significativamente cuando se expusieron porciones del lecho de la corriente debido a las bajas condiciones de agua (NRC, 2005).

El método del Criterio de Consenso para necesidades de caudal ambiental, también llamado Texas Consensus Three-Zone surge del proceso de planificación estatal del agua donde se unen las tres principales agencias estatales del agua o recursos naturales, la Junta de Desarrollo del Agua (Texas Water Development Board), la Comisión de Conservación de Recursos Naturales de Texas (Texas Natural Resource Conservation Commission) y el Departamento de Parques y Vida Silvestre de Texas (Texas Parks and Wildlife Department) junto con otras partes interesadas para actualizar el Plan Estatal de Agua (Gordon et al., 2004).

#### 4.1.7 Método de Caudal base

Este método fue elaborado por Palau & Alcazar (1996) en la Universidad de Lérida (Norte de España). El método determina un caudal base ó "caudal mínimo medioambiental" y lo define como *"el caudal que mantiene un nivel dado de funcionalidad biológica y garantiza una continuidad de las comunidades naturales sin la intervención del hombre"* (Mayo, 2000). El método considera que el régimen del caudal es la única variable independiente en el ecosistema fluvial y los demás componentes del sistema depende de este, por lo tanto el caudal y sus variaciones determinarían los factores físicos y bióticos del hábitat fluvial y la relación de funcionalidad entre ellos. Además, considera que los macroinvertebrados y comunidad piscícola son los indicadores que mejor evalúan las alteraciones del ecosistema, siendo estos las variables más sensibles y dependientes al régimen de caudales (Mayo, 2000) ,(Agualimpia & Castro, 2006) (Palau. & Alcazár, 2010). En este método el caudal base se determina aplicando el método de medias móviles a los caudales medios diarios de una serie de datos no menor a diez años. El caudal obtenido por medio de esta metodología es específico para cada río, y debido a que usa solamente datos históricos de caudal, no se podría aplicar a ríos que carezcan de esta información (Mayo, 2000)..

#### 4.1.8 Método de Arkansas

Fue desarrollado con base en el método Tennant, Este método determina caudales independientes para cada mes del año, pero obtenidos también a partir de porcentajes de los caudales medios mensuales. Para esto divide el año hidrológico en tres periodos en función de las características biológicas y físicas de los cursos de agua y determina el caudal ecológico como una base mensual correspondiente a un porcentaje del caudal medio mensual en cada periodo del año. Para el caso de Arkansas el periodo de caudales elevados (noviembre a marzo) se recomienda el 60% del caudal medio mensual, en época de desove (abril a junio), el 70% y para el periodo de caudales bajos (junio a octubre) el 50%.

La aplicación de este método produce estimaciones muy altas del caudal ecológico para cursos de agua salmonícolas. Las variables utilizadas en este método son los periodos estacionales del año, el ciclo biológico de las especies y los caudales medios mensuales.

### 4.1.9 Norma Francesa

Según lo dispuesto en el artículo 410 de la Ley Nº 84-512, de 29 de junio de 1984, sobre pesca en agua dulce y ordenación de los recursos pesqueros del (Antiguo) código rural francés, y en la Ley n ° 2006-1772 del 30 de diciembre de 2006 - art. 6 JORF 31 de diciembre de 2006 del código del medio ambiente francés; el caudal mínimo que garantice permanentemente la vida, circulación y reproducción de las especies que habitan las aguas en un río no deberá ser inferior al 10% del caudal medio interanual calculado para un periodo no menor a 5 años.

### 4.1.10 Norma Suiza

La Asamblea Federal de la Confederación Suiza en la Ley Federal de Protección de Aguas (814.20) de 1993 (Water Protection Act) (WPA, 2017) en el artículo recomienda que cuando se realice extracción en un curso de agua que fluye permanentemente, se debe calcular a partir del caudal promedio en 10 años que alcance o supere un promedio de 347 días por año (Q347); este caudal residual mínimo debe ser el siguiente:

Hasta un caudal Q347 de 60 L/s 50 L/s y por cada 10 L/s adicionales de caudal Q347	50 L/s 8 L/s más,
para un caudal Q347 de 160 L/s y por cada 10 L/s adicionales de caudal Q347	130 L/s 4.4 L/s más,
para 500 L/s de caudal Q347 y por cada 100 L/s adicionales de caudal Q347	280 L/s 31 L/s más,
para 2.500 L/s de caudal Q347 y por cada 100 L/s más de caudal Q347	900 L/s 21.3 L/s más,
para 10.000 L/s de caudal Q347 \ y por cada 1000 L/s de caudal Q347	2.500 L/s 150 L/s más,
a partir de 60.000 L/s de caudal Q347	10.000 L/s.

El caudal residual mínimo calculado recomendado anteriormente se incrementará si los siguientes requisitos no se cumplen o no se pueden cumplir como resultado de otras medidas: a) si la calidad del agua de las aguas superficiales debe mantenerse a pesar de la extracción de agua y las descargas de aguas residuales existentes; b) si deben seguir siendo reabastecidas las aguas subterráneas de manera tal que el suministro de agua potable a quien dependa de ellos permanezca disponible en la medida necesaria, y que el balance hídrico de los suelos utilizados para la agricultura no se vea sustancialmente afectado; c) Los hábitats raros y las biocoenosis que dependen directa o indirectamente del tipo y tamaño de una masa de agua deben mantenerse o cuando sea posible, ser reemplazados por otros de valor similar, a menos que razones imperiosas lo impidan; d) La profundidad del agua necesaria para la libre migración de peces debe mantenerse; e) En el caso de los cursos de agua con un caudal de Q347 de hasta 40 litros por segundo por debajo de una altitud de 800 metros sobre el nivel del mar que sirven como lugares de



desove o hábitats para peces juveniles, debe garantizarse la continuación de estas funciones.

Esta misma ley en el artículo 32 establece algunas excepciones, de tal manera que las autoridades estatales pueden establecer tasas de caudal mínimas más bajas en las siguientes circunstancias: a) Si el caudal Q347 del cuerpo de agua es inferior a 50 L/s: a lo largo de un tramo de 1.000 m por debajo de un punto de extracción de un cuerpo de agua situado a una altitud superior a 1.700 m sobre el nivel del mar o desde un cuerpo de agua no adecuado como hábitat para peces y situado a una altitud entre 1.500 y 1.700 m sobre el nivel del mar b) En el caso de las extracciones de agua de cuerpos de agua no adecuados como hábitats para peces, siempre que la tasa de flujo residual represente al menos el 35% de la tasa de flujo Q347; o si en un tramo de 1000 m por debajo de un lugar de retiro en secciones con potencial ecológico insignificante, siempre que las funciones naturales del cuerpo de agua no se vean afectadas de manera sustancial c) Si en el marco de una planificación de protección y utilización para un área limitada que forma un conjunto topográfico, en la medida en que se pueda lograr un equilibrio adecuado en la misma área mediante medidas específicas, como abstenerse de retiros adicionales; dicho plan de protección y utilización requerirá la aprobación del Consejo Federal d) En casos de necesidad, para retiros limitados en el tiempo, en particular para el suministro de agua potable, para la lucha contra incendios o para el riego agrícola. (Mayo, 2000) propone la siguiente ecuación para calcular el valor de Q347

$$Q_{347} = (A_o \times Q_{an})/10$$

Donde:

$A_o$ : es el caudal medio anual

$Q_{an}$ : coeficiente que toma valores de 0.5, 1, 1.5, 1.8.

Este método supone que si los caudales no disminuyen por debajo de los caudales mínimos naturales las poblaciones acuáticas pueden mantenerse, sin embargo, esto no es del todo cierto. Las poblaciones se han adaptado para soportar condiciones de caudales bajos por un tiempo determinado sin tener consecuencias graves, pero si son expuestas a esta condición de sequía por un tiempo muy prolongado si podría llegar a tener un impacto negativo importante sobre estas poblaciones, llegando incluso a modificar totalmente al ecosistema (Mayo, 2000).

#### 4.1.11 Método de Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA)

Este método fue propuesto en Estados Unidos por (B. D. Richter et al., 1996), este método se basa en calcular 32 parámetros hidrológicos que son biológicamente relevantes, estos parámetros son divididos en cinco grupos para caracterizar estadísticamente la variaciones hidrológicas interanuales. Los cinco grupos se basan en características fundamentales de los regímenes hidrológicos: 1) La magnitud en un momento dado es una medida de la disponibilidad o idoneidad del hábitat y define atributos de hábitat como área húmeda o volumen del hábitat, o la profundidad del nivel freático en relación con zonas de

enraizamiento de humedales o plantas ribereñas 2) El momento puede determinar si se cumplen ciertos requisitos del ciclo de vida o si puede influir en el grado de estrés o mortalidad de especies, asociados con condiciones extremas del agua, como inundaciones o sequías 3) la frecuencia puede estar relacionada con la reproducción o los eventos de mortalidad de varias especies, influyendo en la dinámica de la población 4) La duración puede determinar si una fase particular del ciclo de vida puede completarse o el grado en que los efectos desfavorables, como la inundación o la desecación puede acumularse 5) La tasa de cambio puede estar vinculada al estancamiento de ciertos organismos a lo largo del borde del agua o en depresiones en estanques, o la capacidad de las raíces de las plantas para mantener el contacto con los suministros de agua freática.

El método evalúa las perturbaciones asociadas a las diferentes actividades humana sobre el caudal natural mediante la comparación de medidas de tendencia central y dispersión para cada parámetro entre rangos de tiempo definidos como "pre-impacto " y "post-impacto", lo cual genera 64 Indicadores de Alteración Hidrológica. El método IHA tiene cuatro pasos: 1) Defina las series de datos para períodos de pre y post impacto en el ecosistema de interés 2) Calcular valores de atributos hidrológicos. Calculamos valores para cada uno de los 32 parámetros hidrológicos ecológicamente relevantes para cada serie de datos en cada año, es decir, un conjunto de valores para la serie de datos de pre-impacto y uno para la serie de datos de post-impacto 3) Con base en el paso 2 se Calcula las estadísticas interanuales para los 32 parámetros en cada serie de datos (medidas de tendencia central y dispersión). Esto produce 64 estadísticas interanuales para cada serie de datos (32 medidas de la tendencia central y 32 medidas de dispersión) 5) Calcular los valores de la IHA. Comparar las 64 estadísticas interanuales entre las series de datos anteriores y posteriores al impacto, y presentar cada resultado como una desviación porcentual de un período de tiempo (la condición posterior al impacto) en relación con el otro (la condición previa al impacto).

El método se puede usar para comparar el estado de un sistema a lo largo del tiempo (por ejemplo, antes o después del impacto como se acaba de describir), o se puede usar para comparar el estado de un sistema con otro o condiciones actuales simular resultados basados en modelos de modificación futura de un sistema. Este método recomienda usar el caudal medio diario ya la sensibilidad del método IHA para detectar alteraciones hidrológicas se ve cada vez más comprometida con intervalos de tiempo más largos que un día.

#### **4.1.12 Método de Rangos de Variabilidad.**

Este método también llamado RVA por sus siglas en inglés (Range Variability Approach), fue propuesto por (Brian D. Richter et al., 1997)(Richter et al., 1997), este método usa los caudales medidos diarios en un período durante el cual las perturbaciones humanas al régimen hidrológico fueron insignificantes.

Este registro de caudales se caracteriza utilizando los 32 parámetros hidrológicos usados en el método IHA propuesto por (Richter et al., 1996). En el método RVA se seleccionan como objetivos iniciales de gestión de flujo un rango de variación en cada uno los 32 parámetros, por ejemplo, los valores de  $\pm 1$  la desviación estándar de la media o el rango de percentiles de 25 a 75.

El RVA identifica los objetivos de manejo anual del río basado en la caracterización estadística de los indicadores ecológicas más importantes del régimen de caudales, una vez identificados lo objetivos de manejo, el método usa un grupo de reglas de gestión o un sistema de manejo que lleve al alcanzar estos objetivos sobre una base anual. La aplicación de estas reglas de manejo se monitorea y con los resultados del monitoreo se definen mejor los objetivos y las reglas de manejo. (Richter et al., 1996) propone seis pasos básicos para establecer, implementar y refinar los objetivos y reglas de manejo para un río específico o un tramo de río.

El proceso de caracterización del rango natural de variación comienza con la identificación de un período de registro adecuado que represente adecuadamente las condiciones naturales, históricas o menos perturbadas. Normalmente, esto requerirá tener registros que preceden a la perturbación humana sustancial. En la mayoría de las ocasiones los datos de caudal a largo plazo para el período representativo no estarán disponibles para todos los ríos o tramos de interés. Por lo tanto, el RVA se estructura para abordar tres escenarios diferentes de disponibilidad de datos. Escenario 1 en el cual existen registros de un periodo representativo de condiciones naturales, Escenario 2 existe un inadecuado registro de caudales para un periodo representativo de condiciones naturales y Escenario 3 donde no se tiene registro de caudales para el periodo de interés, Pero se debe tener en cuenta que el nivel de incertidumbre aumenta, y la cantidad de confianza en los objetivos de gestión resultantes disminuye, a medida que disminuye la disponibilidad de datos hidrológicos (Brian D. Richter et al., 1997).

#### 4.1.13 Método Asturiano

Este método también llamado Legislación Asturiana se basa en la norma suiza y usa el Q347 para determinar el caudal; su principal interés es mantener el ciclo de reproducción, migración y producción de especies salmónidas (Consuegra, 2013). El método establece tres niveles de protección de los cauces. Para el nivel de protección I(bajo), el caudal mínimo será el valor más alto obtenidos de las siguientes fórmulas:

- (1)  $Q \text{ mínimo} = 50 \text{ l/s}$
- (2)  $Q \text{ mínimo} = 0.35 \times Q347$
- (3)  $Q \text{ mínimo} = (15 \times Q347) / (\ln Q347)^2$
- (4)  $Q \text{ mínimo} = 0.25 \times Q347 + 75 \text{ l/s}$

Los valores manejados en las ecuaciones deben estar en litros por segundo, si se usa metros cúbicos por segundo la información obtenidas al aplicar la fórmula 3 y 4 será

incongruentes. En el nivel de protección II (medio) el caudal correspondiente al nivel I aumentará en 2 l/s por km<sup>2</sup> de cuenca, y para el nivel de protección máximo III, se aumentará al caudal del nivel bajo 4 l/s por cada km<sup>2</sup> de cuenca. Además, en los ríos que presenten una importante riqueza piscícola el caudal debe ser aumentado en la cantidad que garantice la salud de la fauna piscícola, aunque la metodología no especifica cuál debe ser esa cantidad.

Analizando los resultados obtenidos al aplicar las cuatro formulas se observa que con la fórmula (4) se obtienen caudales superiores que los obtenidos con las fórmulas (1) y (3); pero cuando se usan valores de Q347 mayores a 750 l/s la fórmula (2) proporciona valores de caudales superiores a los obtenidos con la fórmula (4), por lo tanto, el método se reduce a la aplicación de dos de las cuatro fórmulas: la formula (4) si Q347 es menor de 750 l/s, y formula (2) si Q347 es mayor de 750 l/s (Mayo, 2000).

#### 4.1.14 Método Navarro

Esta metodología se basa en la ley suiza y en la ley francesa para determinar el caudal mínimo, el cual se define en función del tipo de población piscícola (Ciprínidos o Salmónidos) presentes en el cuerpo de agua.

Para las corrientes con especies de salmónidos el método recomienda el Q330 como el caudal mínimo, además no se admitirán las concesiones que soliciten un caudal superior al Q80, ya que este caudal es muy elevado. Para los ríos con especies ciprinícolas el método recomienda como caudal mínimo el 10% del caudal medio interanual, fijo para todo el año, pero cuando se superen los 50 m<sup>3</sup>/s se disminuirá a un 5% durante los meses de junio a octubre.

#### 4.1.15 Método de Matthey

Este método usa el Q300 para determinar el caudal mínimo aplicando las siguientes formulas:

$$(1) Q_{\text{mínimo}} = \frac{(15 * Q_{300})}{(\ln Q_{300})^2}$$

$$(2) Q_{\text{mínimo}} = 0.25 * Q_{300}$$

$$(3) Q_{\text{mínimo}} = 0.20 * Q_{300}$$

Pero debido a que con estas fórmulas se obtenían caudales muy altos, se decidió cambiar el Q300 por el Q347. Posteriormente se sustituyó Q300 por Q347, ya que los caudales resultantes de la aplicación de las fórmulas originales resultaban ser muy altos. Cuando se usa el Q300 en las formulas se dejan por fuera los caudales más bajos que corresponden las épocas de estiaje. Utilizando las fórmulas originales se consiguen unos caudales bastante conservadores, pues al utilizar Q300 se dejan fuera los caudales más bajos correspondientes a parte de la época de estiaje, pero usando el Q347 se obtiene caudales muy bajos (Mayo, 2000).

## 4.2 Metodologías de clasificación hidráulica.

Según (Tharme, 2003), el termino de metodologías de “clasificación Hidráulica” (también conocida como de descarga de hábitat o de secciones transversales) fue acuñado por (Loar et al., 1986) para describir los métodos que se basan en variables hidráulicas simples como el perímetro mojado, el ancho o la profundidad máxima para determinar un caudal mínimo; estas variables generalmente se miden en una o varias secciones transversales del río, y comparan la variables hidráulicas de interés con la velocidad de descarga, lo cual puede ser un factor limitante para la población acuática de interés; estos métodos generalmente se usan para determinar el caudal mínimo necesario en época desove de especies piscícolas o para la producción máxima de invertebrados bentónicos (Gordon et al., 2004).

Los tramos de menos profundidad son comúnmente elegidos para aplicar las metodologías de clasificación hidráulica, debido a que estos tramos son los primeros en verse afectados por la alteración del flujo, además mantener los rápidos también mantendrá las condiciones de la piscina. Estos métodos suponen que mantener umbrales mínimos en los parámetros hidráulicos seleccionados preservará la salud e integridad de la biota y el ecosistema, y si estos umbrales se exceden, la calidad del hábitat se verá afectada significativamente. Estos métodos son más difíciles de aplicar que los métodos hidrológico, ya que demandan mayor trabajo de campo y analítico, y por lo general no son adecuados para la evaluación de los requisitos de flujo estacional (Eslamian & Eslamian, 2016).

### 4.2.1 Método del perímetro mojado

El método fue propuesto por (Nelson, 1980) y es uno de los métodos más usados para determinar el caudal ambiental. El método fue desarrollado para los ríos del estado de Montana (EE. UU) y está destinado a satisfacer las necesidades de caudal solo para la etapa de trucha adulta. La razón para ignorar las otras etapas de la vida de la trucha se basa en la premisa de que el número de nuevos individuos que ingresan en una población de truchas adultas residentes es dictado principalmente por los adultos y no por el número de huevos, alevines o juveniles que producen los individuos (Nelson, 1980) y se basa en la hipótesis de que existe una relación directa entre el hábitat piscícola y la parte mojada de la sección del cauce.

Este método relaciona por medio de una gráfica el perímetro mojado con la descarga en una única sección transversal de rápidos y se basa en el hecho de que a medida que disminuye el perímetro mojado en una corriente la descarga también disminuye, pero la tasa de pérdida de perímetro mojado no es constante en todo el rango de la descarga. Partiendo de un nivel de caudal cero, con pequeños aumentos en la descarga también aumenta rápidamente el perímetro mojado, pero luego de un punto donde el canal se acerca a su ancho máximo, la tasa de crecimiento del perímetro mojado es menor respecto al aumento de la descarga.

(Nelson, 1980) eligió el perímetro mojado porque consideró que era el único parámetro relacionado con la cantidad de hábitat disponible para la trucha adulta en los ríos de la zona que estudió, y que podría existir una relación entre el perímetro y el hábitat ya que el perímetro es una medida del fondo y las truchas adultas están orientadas principalmente al fondo del río, además asumió que una vez que la tasa de pérdida del perímetro mojado comienza a acelerarse (en el punto de inflexión en la curva de descarga respecto al perímetro mojado) la pérdida del hábitat de las truchas adultas también se aceleraría.

#### **4.2.2 Método de múltiples transectos**

El método de transectos múltiples es un intento de solucionar los problemas asociados con la dependencia de un solo transecto y una sola variable, como en el método del perímetro húmedo (Nelson, 1980). este método es un medio empírico para determinar cambios en el hábitat con cambios en la descarga. Para determinar el caudal ambiental se miden una serie de transectos dentro de un río y luego se realizan mediciones de variables tales como profundidad, velocidad, sustrato y cubierta en los transectos. Con esta información se pueden determinar los cambios en estas variables con respecto a la descarga. Es posible construir un mapa de la corriente a partir de los datos recopilados en todos los transectos para cada descarga y realizar una modelación hidráulica para conocer los cambios entre la variación del caudal y las variables medidas en las diferentes zonas del río. Si se conocen los requisitos de hábitat de ciertas especies de peces, también se puede determinar el cambio en la idoneidad de un área a diferentes descargas (Arthington & Zalucki, 1998a). El modelo asume que el caudal más favorable o el ecológico es el que garantiza el movimiento libre de las especies, la calidad del agua, el transporte de sólidos y posibilita la recreación (Flachier, 2016).

#### **4.2.3 Método de Colorado de la región 2 de U.S.F.W.S.**

Este método fue desarrollado por (Russell & Mulvaney, 1973) para los ríos salmonícolas de las montañas rocosas del estado de Colorado, sudeste de los Estados Unidos. Este método se basa en la simulación hidráulica de áreas críticas previamente seleccionadas y sus respectivas secciones transversales, con esta información para se determina el perímetro mojado y el área de sección transversal para la velocidad media y profundidad, a partir de esto de se definen las curvas de variación de los parámetros hidráulicos en función del caudal. Por lo general estas áreas corresponden a las zonas menos profundas y rápidas (Wesche & Rechard, 1980) (Aguilimpia & Castro, 2006).

#### **4.2.4 Método de Idaho**

Este método fue desarrollado por (White & Cochnauer, 1975) quienes realizaron una revisión de los requisitos ecológicos de algunas especies de peces y concluyeron que hasta esa fecha no existía información concreta acerca de los requisitos ecológicos específicos para las especies de peces presentes en los ríos de Idaho, y consideraron que

ninguna de las metodologías consultadas era adecuada para la aplicación directa a un sistema fluvial grande. Por lo anterior propusieron el método de Idaho para recomendar caudales de mantenimiento en ríos grandes. Esta metodología tiene en cuenta los requisitos ambientales y el movimiento, desove y crianza de peces, además a diferencia de otras metodologías esta solo requiere un conjunto de observaciones de campo.

La metodología se basa en el concepto básico de la predicción de la pérdida de hábitat que se presenta con la reducción de la descarga, y relación de la pérdida prevista con los requisitos físicos y biológicos de las especies de peces clave. La metodología usa un modelo computarizado desarrollado por el Bureau of Reclamation el cual se usa para predecir la morfometría del canal y las características hidráulicas con descargas bajas y altas específicas. Con estas predicciones, los cambios en el hábitat de la corriente pueden ser determinados.

El método propone unas características específicas en el río (profundidad y velocidad) con el fin de obtener caudales recomendado. Para aplicar el método se necesita información de secciones transversales y su respectiva profundidad, velocidad y sustrato, con lo cual se simula los escenarios y se determinan las condiciones ideales para cada especie. Una ventaja del modelo de Bureau of Reclamation es la capacidad de dividir un transecto en hasta nueve pares y predecir características hidráulicas para el transecto en su totalidad y para cada subsección, esta es una clara ventaja, ya que le permite al investigador examinar partes específicas de una sección transversal y determinar si satisfacen las necesidades de una especie en una etapa biológica en particular (White & Cochnauer, 1975).

#### **4.2.5 Método de la región 4 U.S.F.W.S**

Este método fue desarrollado por (Harrington & Dunham, 1967) para ríos pequeños de las montañas de Idaho, Uta y Wyoming (Estados Unidos) con el objetivo de determinar los caudales mínimos necesarios para conservar el hábitat de las poblaciones de salmónidos. Posteriormente el método fue modificado por (Dunham & Colletti, 1975). Los sitios donde se va a aplicar el método se seleccionan usando información topográfica y fotografías aéreas; en cada sitio se definen como mínimo cinco secciones transversales en las cuales se analiza la profundidad, sustrato y características de las márgenes. El método usa modelación hidráulica y se basa en e; caudal para determinar curvas de hábitat con las cuales se busca un porcentaje de hábitat óptimo, el cual será el 100% del caudal necesario para que la etapa de estiaje no se vea afectada (Aguilimpia & Castro, 2006).

#### **4.2.6 Método de Washington**

El Método de Washington también llamado método del Ancho entre puntas (Toe-width method) fue desarrollado por el Departamento de Pesca y vida silvestre de Washington (Washington Department of Fish and Wildlife) y el Servicio Geológico de los EE. UU. (United States Geological Survey) En la década de 1970 y aun es un método usado para

determinar los caudales mínimos para peces (Rushton, 2000), (WSDE, 2018). Para calcular el área del hábitat en cada caudal medido se determinaron los criterios de profundidades y velocidades necesarios para el desove de cría en cada especie de pez y etapa de vida, estos puntos de cantidad de hábitat en diferentes caudales se conectaron para crear una relación entre hábitat de peces y el caudal (Agualimpia & Castro, 2006).

Las relaciones establecidas para el hábitat de los peces en los ríos Washington se compararon con las características de la cuenca para determinar si había una manera fácil de predecir el desove o la cría de ciertas especies de peces. La anchura entre puntas fue la única variable que tuvo una alta correlación. El ancho entre puntas es la distancia desde la punta de un banco de un arroyo hasta la punta del otro banco del arroyo, Las ecuaciones de la función de potencia se utilizaron para derivar el caudal necesario para el desove y la cría de salmón y cabeza de acero (steelhead fish) basado simplemente en una medida de ancho de arroyo (WSDE, 2018), (Rushton, 2000), (Gordon et al., 2004).

### **4.3 Metodologías de simulación de hábitat**

Los métodos de simulación de hábitat también conocido como método Ecohidráulico o Ecohidrológico tienen en cuenta no solo las modificaciones que se presentan en los hábitats físicos cuando cambian los caudales, sino que además integra también las preferencias de hábitat de una especie relacionando el hábitat y la velocidad del agua, estos métodos analizan secciones transversales del río las cuales divide en celdas y evalúa en cada celda los efectos que producen cambios en el caudal sobre la estructura del cauce, la calidad del agua, la temperatura y la disponibilidad de hábitat (Gordon et al., 2004), (Agualimpia & Castro, 2006). Estos métodos son más flexibles que los métodos hidrológicos o hidráulicos, pero requieren conocer bien el ecosistema del río y tener objetivos de manejo claros para resolver los posibles conflictos de hábitat entre especies o etapas de biológicas.

#### **4.3.1 The Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)- PHABSIM (Physical HABitat SIMulation)**

la Metodología del Incremento del Caudal en el Flujo o IFIM (por sus siglas en inglés), también conocida como método de evaluación de hábitat (Bovee, 1982) es uno de los métodos de evaluación de caudal más utilizado en todo el mundo (Tharme, 2003) (Flachier, 2016). El método fue desarrollado a finales de la década de 1970 por el US Fish and Wildlife Service, con el objeto de determinar el impacto que la actividad humana tiene sobre el hábitat de población de peces como el salmón. Desde su desarrollo hace más de 30 años el método ha tenido considerables desarrollos, y algunos de los primeros conceptos se han vuelto redundantes (Gordon et al., 2004).

(King & Tharme, 1994) revisaron la metodología IFIM y diseñaron una guía actualizada para aplicarla. Más que un método, IFIM es una herramienta para solucionar problemas la



cual se basa en procedimientos analíticos y modelos informáticos, permitiendo un enfoque diferente en función de los cambios en las características hidrológicas, hidráulicas y ecológicas en un sistema fluvial

El método IFIM inicia con una descripción de las condiciones iniciales y con el diseño de la estructura de estudio para llegar a una solución final negociada. El concepto "Incremental" hace referencia a la modificación leve o incremental del problema o a la capacidad de observar los efectos de cambios incrementales sobre una variable y la disponibilidad del hábitat hasta llegar a una solución. La metodología ofrece varias soluciones que permiten evaluar diferentes alternativas, de tal manera que dos aplicaciones idénticas del método pueden llevar a soluciones diferentes simplemente debido a diferentes objetivos de administración (Gordon et al., 2004).

El IFIM incorpora los conceptos de macrohábitat y microhábitat y se basa en el concepto de nicho ecológico para explicar cómo se distribuye una comunidad. El concepto de macrohábitat se aplica a gran escala en los gradientes longitudinales y en las características del hábitat a lo largo del río; y el concepto de microhábitat se aplica a los lugares específicos donde por lo general se encuentra una especie en particular. La esencia del componente de evaluación de hábitat del IFIM es el área utilizable ponderada (WUA - Weighted Useable Area) que se modela por medio de un grupo de softwares llamado PHABSIM (Physical HABitat SIMulation).

PHABSIM se ha utilizado tradicionalmente para simular una relación entre el caudal en la corriente y el hábitat físico para varias etapas de la vida de una especie de pez. Los organismos individuales mostraran una tendencia a seleccionar las condiciones de flujo más favorables, pero también usarán condiciones menos favorables y a medida que las condiciones sean menos favorables la preferencia disminuirá (Stalnaker, 1979).

La relación final modela el cambio en la WUA con la descarga. La WUA es un indicador de la idoneidad neta en un tramo dado para una cierta etapa de vida de una determinada especie. En una descarga de caudal particular, el patrón de distribución del hábitat físico (profundidad, velocidad, cobertura y sustrato) se evalúa sobre el tramo de la corriente, esto se combina con las curvas del Índice de Idoneidad del hábitat (SI) para determinar la WUA para esa descarga. El hábitat físico se redefine en cada descarga y los cálculos se repiten para obtener WUA en función de la descarga.

Las funciones de descarga-hábitat de PHABSIM se pueden combinar con datos de caudal para obtener series de tiempo de hábitat mensuales y diarias y curvas de duración de hábitat utilizando otros programas. La serie temporal del hábitat es útil para comparar la disponibilidad de hábitat antes y después del proyecto.

## 4.4 metodologías holísticas

Los métodos holísticos fueron desarrollados en la década de los noventa y se considera en enfoque más reciente; estos métodos surgen debido a la necesidad de una metodología

que busque mantener el ecosistema en su totalidad y no sólo algunos de sus componentes. Estas metodologías buscan una visión global del río y consideran que los caudales son el soporte básico para todos los elementos y/o propiedades del ecosistema fluvial, integra factores socioeconómicos, abarcando todas las áreas que afectan el caudal ambiental y son afectadas por éste (Guevara & Rodríguez, 2013)

Según (Arthington & Zalucki, 1998a) Existen tres suposiciones que son fundamentales para este enfoque:

1. El agua pertenece al medio ambiente y, por lo tanto, otros usuarios de esa agua solo pueden acomodarse a partir de esa cantidad no requerida por el río.
2. Hay más agua en los sistemas fluviales que la estrictamente necesaria para el mantenimiento del ecosistema fluvial.
3. Si las características esenciales del régimen de flujo natural pueden identificarse e incorporarse adecuadamente en un régimen de flujo modificado, entonces la biota existente y la integridad funcional del ecosistema deben mantenerse

El principal objetivo de los enfoques holísticos es identificar todas las características esenciales del régimen hidrológico, para lo cual se necesita extensa información tal como registros históricos de caudales, variables hidráulicas, etc. Después un panel de expertos emite recomendaciones y determina la influencia de esos aspectos sobre las características geomorfológicas y ecológicas del ecosistema del río, valorando cada particularidad del flujo, para finalmente desarrollar un régimen de caudales modificado (Guevara & Rodríguez, 2013).

#### **4.4.1 Método de Building Block - Aproximación Bottom-up**

Este método se basa en trabajos de investigación ya realizados; y junto con el apoyo de un grupo multidisciplinarios de expertos intenta entender la respuesta caudal-características hidráulicas usando modelos. La metodología le da gran importancia al factor socioeconómico y con apoyo de la comunidad evalúa la dependencia de los ecosistemas fluviales a este factor. En esta metodología los building block son la descripción de cada uno de los componentes del flujo, conformando los “Requerimientos de Caudal” y estimando el caudal recomendado a partir de un flujo mínimo hacia valores más altos (aproximación BottomUp) (ENDESA, 2011).

#### **4.4.2 Benchmarking - Aproximación Topdown**

La Metodología Benchmarking identifica indicadores hidrológicos clave que tienen relevancia ecológica y luego determinar para cada indicador las implicaciones ecológicas de los diferentes niveles de desviación de su valor natural. Esto se logra haciendo comparaciones entre referencia casi naturales y un conjunto de referencia sujetos a diferentes niveles de impacto resultantes del desarrollo de los recursos hídricos existentes.

Las referencias se seleccionan para cubrir un rango de niveles de cambio de régimen de caudal. Se evalúan los impactos ecológicos en cada una de las referencias y se examinan los vínculos con el cambio de régimen de caudal. Una vez que se documentan los vínculos entre el cambio de régimen de caudal y los impactos ecológicos, estos forman la base para el desarrollo de un marco de evaluación de riesgos dentro del cual se pueden evaluar varios escenarios alternativos de gestión futura de los recursos hídricos. Esta metodología consta de cuatro etapas principales: 1) establecimiento, 2) condición ecológica y evaluación de tendencias, 3) desarrollo de un marco de evaluación de riesgo de flujo ambiental y 4) evaluación ambiental de posibles escenarios futuros de gestión de recursos hídricos nominados por el gobierno de Queensland. (Brizga et al., 2002)

#### 4.4.3 Método de enlace BBM /Modelo Reserva de Escritorio

El método se basa en la "metodología de bloques de construcción" o BBM por sus siglas en inglés (building block methodology) propuesta por (King & Louw, 1998) y en el Modelo de Reserva de Escritorio (Desktop Reserve Model) diseñado por el Instituto para la Investigación del Agua) (D.A. Hughes & Münster, 2000).

El Modelo de Reserva de Escritorio fue diseñado de tal manera que debería basarse en los mismos conceptos que el BBM, generar información de salida en el mismo formato o en un formato similar. El modelo se basó solo en 30 determinaciones previas, pero en el 2001 este número aumentó a 97, con lo cual se decidió revisar los parámetros del modelo para evaluar la utilidad del modelo (Denis A Hughes & Hannart, 2003).

En términos generales el BBM cuantifica las características de un régimen de caudal modificado que mantiene algún nivel predeterminado de funcionamiento ecológico en el río según el criterio de expertos, quienes usan su conocimiento del funcionamiento del río basándose en una comprensión de los requisitos del hábitat, que luego se traducen en requisitos de caudal a través de las características hidráulicas del canal. La cuantificación inicial implica definir valores de mes calendario para cuatro 'bloques: caudales bajos o bases en años de 'mantenimiento', caudales bajos o bases en años de sequía, caudales altos y elevados (picos y duraciones) para años de mantenimiento, y caudales altos y eventos de elevados para años de sequía.

El resultado final del BBM es una tabla de caudales para cada mes del año para un rango porcentual de certeza, y que estos valores de certeza son equivalentes a los puntos porcentuales de la curva de duración. Por ejemplo, si se produjera un caudal natural que iguala o supera en el 70% del tiempo del régimen de caudal natural, entonces el requerimiento de caudal sería el caudal de BBM para el mismo mes con una certeza del 70%. El modelo de Reserva de Escritorio incorpora el supuesto que los requisitos totales de agua para un río disminuirán en la medida que la categoría ecológica propuestas por (DWAF, 1999) cambie de A a D (Tabla 4-1).

**Tabla 4-1:** Marco propuesto para establecer los objetivos de calidad de los recursos ecológicos sobre la base de un sistema de clasificación (DWAF, 1999)

Clase	Cantidad de agua	Calidad del agua	Hábitat en la corriente	Hábitat riparios	Biota
A	permite modificaciones insignificantes en la variabilidad natural	Modificación insignificante de lo natural. Permitir un riesgo insignificante para las especies sensibles.	Permitir la modificación insignificante de las condiciones naturales.	Permitir la modificación insignificante de las condiciones naturales.	Se debe presentar modificaciones insignificantes respecto a las condiciones de referencia
B	Establece un caudal que permitir solo un riesgo leve para la biota especialmente intolerante.	Utiliza los ecosistemas acuáticos para establecer objetivos que solo permitan un ligero riesgo para la biota intolerante.	Permitir una ligera modificación de las condiciones naturales.	Permitir una ligera modificación de las condiciones naturales.	Puede ser ligeramente modificado respecto a las condiciones de referencia.
C	Establece un caudal que permitir un riesgo moderado para la biota intolerante	Utilice los ecosistemas acuáticos para establecer objetivos que solo permitan un riesgo moderado para la biota intolerante.	Permitir la modificación moderada de las condiciones naturales.	Permitir la modificación moderada de las condiciones naturales.	Puede ser moderadamente modificado de las condiciones de referencia.
D	Establece un caudal que resultar en un alto riesgo de pérdida de biota intolerante.	Usa ecosistemas acuáticos para establecer objetivos que pueden resultar en un alto riesgo para la biota intolerante.	Permitir un alto grado de modificación de las condiciones naturales.	Permitir un alto grado de modificación de las condiciones naturales.	Puede ser altamente modificado de las condiciones de referencia.

El proceso de cuantificación que realizan los especialistas en una determinación de BBM se puede resumir de la siguiente manera:

$$\text{Requerimiento de caudal} = F(\text{Características del régimen hidrológico}) + \text{Ruido}$$

El término ruido en la ecuación es permitir el hecho de que las relaciones no se entienden completamente y que los especialistas están basando sus evaluaciones en el juicio de expertos sin el beneficio de un estudio científico riguroso específico del sitio.

El método usa el coeficiente de Variación (CV) de todos los caudales mensuales para cada mes calendario y la suma de los CV medios para los tres principales meses de la época seca y húmeda para estimar el requerimiento de caudal, determina la proporción de caudal total que podría llegar a transformarse en caudal base por medio de un índice de caudal base (BFI), este índice se calcula a partir de la relación del caudal base anual promedio con el caudal total anual promedio (Denis A Hughes & Hannart, 2003).

dividiendo estos dos índices (CV/BFI) Se produce un índice general de variabilidad (CVB). El modelo de reserva de escritorio consta de tres componentes principales:

Estimación de los totales anuales de los 'bloques de construcción' (mantenimiento y sequía, caudales altos y bajos) a partir de las características hidrológicas de los caudales naturales mensuales.

Estimación de las distribuciones estacionales de los totales anuales para las distribuciones estacionales de los caudales naturales separados en componentes de flujo alto y bajo.

Estimaciones de las reglas que combinan los requerimientos de mantenimiento y sequía en curvas de frecuencia.

#### **4.4.4 DRIFT (Downstream Response to Imposed Flow Transformations)**

Esta metodología fue desarrollada por (Brown & King, 2000) para evaluar los requisitos de flujo para el mantenimiento de ríos (Caudal ambiental- CA) que están sujetos a desarrollos hídricos. Tiene seis atributos importantes. Primero, proporciona un enfoque holístico para las evaluaciones de CA, ya que aborda todas las partes del régimen de caudal intraanual e interanual, y todas las partes vivas y no vivas del ecosistema fluvial desde la fuente hasta el mar.

Al igual que otros enfoques holísticos, DRIFT es esencialmente una herramienta de gestión de datos, que permite que los datos y el conocimiento se utilicen para su mejor ventaja en un proceso estructurado. Su razón central es que diferentes partes del régimen de flujo provocan diferentes respuestas del ecosistema del río. Por lo tanto, la eliminación de una parte del régimen de flujo afectará al ecosistema de manera diferente que la eliminación de otra parte. Además, se supone que:

- es posible identificar y aislar estas diferentes partes del régimen de flujo dentro de un conjunto de datos hidrológicos a largo plazo de flujos diarios; Un enfoque holístico basado en escenarios para las evaluaciones de flujo ambiental 10
- es posible describir de forma aislada las probables consecuencias biofísicas de la eliminación parcial o total de cualquiera de estas partes;
- las partes del régimen de flujo y sus consecuencias vinculadas se pueden volver a combinar de varias maneras, para describir la condición del río de cualquier régimen de flujo de interés (la parte biofísica del escenario);
- se pueden describir los impactos sociales de cada condición del río (la parte socioeconómica del escenario). Aunque se puede usar el mismo proceso en la

dirección opuesta para agregar flujos de retorno como parte de la rehabilitación de un río degradado, en este documento nos enfocamos en la reducción del flujo.

Basado en los supuestos anteriores, DRIFT consta de cuatro módulos principales. El primero, o módulo biofísico, se utiliza para describir la naturaleza actual y el funcionamiento del ecosistema, y para desarrollar la capacidad predictiva de cómo estos cambiarán bajo un rango de diferentes manipulaciones de flujo. Se crea una base de datos de cambios relacionados con el flujo previsto. El segundo, o módulo sociológico, se utiliza para identificar a los usuarios de subsistencia en riesgo por las manipulaciones del flujo (la Población en riesgo), y para cuantificar sus vínculos con el río. En el tercer módulo, los resultados de los dos primeros se unen para producir los escenarios biofísicos y de subsistencia. El cuarto módulo aborda los costos de mitigación y compensación (J. M. King et al., 2004).

#### **4.4.5 ELOHA- Ecological Limits of Hydrologic Alteration**

desarrollaron un nuevo.

La metodología ELOHA es un marco metodológico y fue desarrollada por los científicos internacionales de diez organizaciones para evaluar las necesidades de caudales ambiental para muchos arroyos y ríos simultáneamente, este marco está diseñado para enfrentar los desafíos gemelos de abordar directamente las condiciones ecológicas y acelerar enormemente la evaluación e implementación los caudales ambientales. ELOHA sintetiza sistemáticamente el conocimiento y la experiencia obtenidos de los estudios de ríos individuales para apoyar y guiar el desarrollo de estándares de flujo ambiental a escala regional. Este marco responde particularmente a las necesidades de los administradores de agua regionales y nacionales para definir estándares de flujo ambiental para muchos ríos simultáneamente, incluidos aquellos para los que actualmente existe poca información hidrológica o ecológica, para integrar efectivamente las necesidades de agua humana y del ecosistema de manera oportuna e integral manera (Kendy et al., 2009)

El marco de ELOHA implica una serie de pasos interconectados, bucles de retroalimentación e iteraciones. Las relaciones entre la alteración del caudal y las características ecológicas para diferentes tipos de ríos constituyen el elemento clave que vincula los aspectos hidrológicos, ecológicos y sociales de la evaluación del flujo ambiental. Estas relaciones se basan en un flujo de flujo emparejado y datos ecológicos de toda la región de interés. La descripción del marco de ELOHA se presenta de manera gradual, reconociendo que varios procesos científicos y sociales probablemente se realizarán simultáneamente y muchos deben repetirse de forma iterativa. El proceso científico consta de cuatro pasos principales, cada uno con una serie de componentes técnicos (L. Poff et al., 2010).

#### **4.4.6 Método para Estimar Caudal Ambiental en Proyectos Licenciados (Mads), Colombia**

Esta metodología fue desarrollada en el 2008 por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) de Colombia y la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (UNC) con el fin de estimar los caudales ambientales en grandes proyectos licenciados Bogotá (UNC). La metodología tiene en cuenta los siguientes criterios Hidrológicos: 1) Información hidrométrica. 2) Consistencia y calidad de la información hidrométrica primaria. 3) Variabilidad hidrológica interanual y estacional de la corriente. 4) Consistencia de la propuesta hidrológica con metodologías de tipo hidrológico de estimación de caudales ambientales internacionalmente aceptadas y 5) Comparación de las características hidrológicas para las condiciones sin y con proyecto.

Dentro de los criterios hidráulicos y de calidad de agua la metodología tiene en cuenta: 1) Evaluación de usos actuales y prospectivos del agua. 2) Caracterización hidráulica y de calidad del agua a escala de tramo y 3) Evaluación del impacto en la calidad del agua y en el factor de asimilación, y los criterios ecológicos que la metodología tiene en cuenta son: 1) Enfoque comunitario y no específico. 2) Utilización de variables que integren información de una determinada comunidad. 3) Empleo de las propiedades de sensibilidad o tolerancia de grupos de especies indicadoras (recurriendo a información bibliográfica). 3) El hábitat como base para el desarrollo de las comunidades y 4) La integridad biótica como medida del estado de salud del ecosistema

La metodología garantiza criterios hidrológicos, realiza una validación hidráulica y de calidad del agua y después determina la integridad del hábitat, para lo cual realiza iteraciones que evalúa las condiciones antes y después de la construcción del proyecto con el objetivo de establecer el caudal que conserve las funciones ecológicas del río y que además garantice los usos del recurso aguas abajo específicamente del componente biótico (Pinilla et al., 2013) (Unal, 2008).

#### **4.4.7 Guía Metodológica Para La Estimación Del Caudal Ambiental- MADS Colombia**

Esta guía metodológica fue desarrollada en el 2017 por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) junto con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y pretende orientar la estimación del caudal ambiental en el territorio colombiano, en el contexto de la gestión integral del recurso hídrico. la metodología involucra aspectos hidrológicos, geomorfológicos, hidráulicos, de calidad del agua, ecológicos y servicios ecosistémicos. Además, establece requerimientos mínimos de información, criterios para la delimitación del área de estudio y alcances específicos de aplicación, en función de la escala de trabajo. Adicionalmente, incorpora elementos de análisis sobre variabilidad climática, evaluación y seguimiento de los caudales ambientales y su importancia para la restauración de ecosistemas acuáticos continentales degradados.

La guía se divide en cuatro capítulos, en el primero se presentan las generalidades relacionadas con los objetivos de la guía, el enfoque conceptual adoptado, los alcances de su aplicación y las definiciones de los términos más recurrentes en el desarrollo del documento; el segundo capítulo detalla la estructura metodológica que orienta la estimación del caudal; en el tercero se presentan los requisitos mínimos de información en función de la escala de trabajo y su uso dentro del esquema metodológico; y finalmente el cuarto capítulo se desarrollan cada uno de los componentes esenciales de la estructura metodológica, mencionando algunos métodos de referencia. La estructura metodológica está constituida por dos niveles de implementación, los cuales se han denominado como Estimación y Gestión. El nivel de Estimación o nivel 1 está compuesto por tres fases:

Fase 1: Levantamiento de información y caracterización del cuerpo de agua;

Fase 2: Estimación del régimen de caudal ambiental, considerando el funcionamiento ecológico (hidrología y ecología)

Fase 3 - Evaluación del régimen de caudal ambiental, considerando servicios ecosistémicos (calidad del agua y bienestar humano).

El caudal ambiental se obtiene como resultado de la Fase 2, en donde se integran aspectos hidrológicos, geomorfológicos, hidráulicos y ecológicos del cuerpo de agua, mientras que la Fase 3 tiene como propósito principal aportar insumos para identificar las medidas de gestión ambiental requeridas para alcanzar o mantener el caudal ambiental calculado previamente. El nivel de Gestión o nivel 2 se desarrolla a partir de los resultados obtenidos en el nivel 1 durante la fase de evaluación de servicios ecosistémicos, con lo cual se determinan los lineamientos para la gestión ambiental que deben ser considerados en los instrumentos de planificación y administración de los recursos naturales renovables que involucran el recurso hídrico superficial (IDEAM & MADS, 2017).

#### **4.4.8 Metodologías combinadas y otros enfoques**

En 1976, se realizó una revisión del estado de los métodos de evaluación de hábitats para proporcionar orientación a futuras investigaciones <sup>1</sup>. La Cooperativa de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos Instream Flow Service Group (ahora la Rama de Sistemas Acuáticos [ASB] del Centro de Investigación de Ecología Nacional) se formó en 1976 para servir como un foco para el problema de flujo de corriente instantánea. Una conferencia importante, copatrocinada por la American Fisheries Society y la American Society of Civil Engineers, definió e identificó el estado del arte y las direcciones para el trabajo futuro <sup>2</sup>. La misión inicial de Instream Flow Group se basó principalmente en las recomendaciones y sugerencias de esta conferencia.

Es así como las metodologías pueden variar desde enfoques de escritorio basados en la información existente, a aquellas que incluyen una recopilación de información intensa y sofisticada con el uso de software especializado. La mayoría de los enfoques se pueden usar tanto en ríos regulados como en aquellos no regulados, aunque algunos métodos han



sido desarrollados especialmente para el caso de restauración de ríos (obviamente regulados).

#### 4.4.9 Estudios Realizado en Colombia para determinar caudales ambientales

En Colombia se han llevado a cabo varios estudios que usan diferentes métodos y variables para determinar caudales ambientales, dentro de los cuales se destacan los presentados en la Tabla 4-2.

**Tabla 4-2:** Revisión de estudios realizados en Colombia para determinar caudales ambientales

ESTUDIO	AUTOR	VARIABLES	FUENTE
Cálculo Del Caudal Ambiental Mediante Una Metodología Holística En La Cuenca Alta Del Río Bogotá	María Alejandra Gómez Díaz. Wilson Stevens Robayo Gutiérrez. Juan David Rondón Díaz. (Gómez et al., 2016)	Hidrológicas. Calidad de agua. Hidráulicos.	Universidad Católica De Colombia Trabajo De Grado Especialista En Recursos Hídricos Bogotá D.C – 2016
Propuesta Metodológica Preliminar Para La Estimación Del Caudal Ambiental En Proyectos Licenciados Por El Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible (Mads), Colombia	Gabriel A. Pinilla Agudelo. Erasmus A. Rodríguez Sandoval. Luis A. Camacho Botero. (Pinilla et al., 2013)	Hidrológicas. Calidad de agua. Hidráulicos. Ecológicos.	Revista Acta Biológica Colombiana, Artículo de investigación Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2013
Estimación De Caudales Ecológicos Mediante Métodos Hidrológicos, Hidráulicos Y Ecológicos En La Quebrada El Conejo (Mocoa-Putumayo)	Natalia Pantoja Valencia. (Pantoja, 2017)	Hidrológicos. Hidráulicos. Ecológicos.	Universidad Pontificia Javeriana Tesis Bogotá, febrero de 2017
Modelación De Idoneidad De Hábitat De La Comunidad Y Grupos Funcionales De Macroinvertebrados	Ángela Judith Motta Díaz. (Motta, 2018)	Hidrológicos. Hidráulicos. Calidad de agua. Biológicas.	Pontificia Universidad Javeriana Tesis de Maestría En Hidrosistemas ogotá, 2018
Calidad De Agua Y Composición De Macroinvertebrados Acuáticos En La Subcuenca Alta Del Río Chinchiná	Ana María Meza-S. Juliana Rubio-M. Lucimar G-Dias. Jeymmy M-Walteros. (Meza-S et al., 2012)	Calidad de agua. Ecológicos.	Revista Caldasia Universidad Nacional de Colombia Artículo de investigación 2012
Estimación de Caudales Ecológicos mediante Métodos Hidrológicos e Hidráulicos para la Cuenca del Río Quindío Usando WEAP como Herramienta de Apoyo	Gabriel Lozano. Elkin Monsalve. Pedro García. Cesar Rodríguez. Juan Gómez. Héctor Triviño. (Lozano et al., 2015)	Hidrológicos. Hidráulicos.	Revista INGE CUC. Artículo de investigación. Universidad de la Costa. Barranquilla – Colombia. 2015

Continuación tabla 4-2

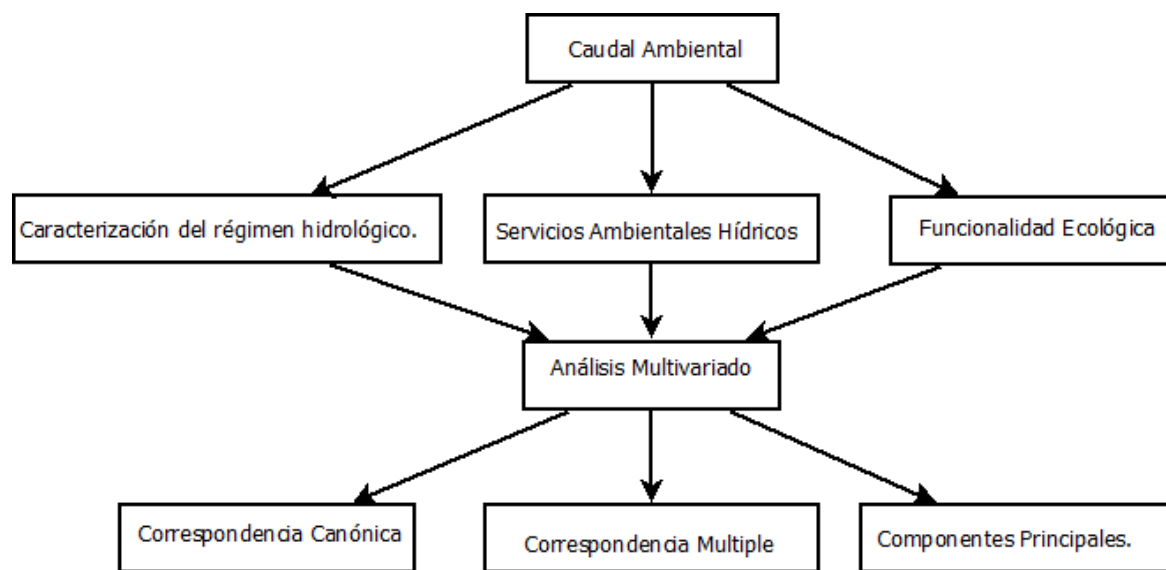
Curvas De Idoneidad De Hábitat Para Macroinvertebrados Bentónicos: Una Herramienta Para La Estimación De Caudales Ambientales	William Cardona Duque. (Cardona, 2012)	Hidráulicos. Calidad de agua. Biológicas.	Universidad del Valle. Tesis de Maestría. Santiago de Cali, 2012
Determinación De Caudales Ambientales Confiables En Colombia: El Ejemplo Del Río Palacé (Cauca)	Juan Manuel Diez. Darío Hernán Ruiz. (Manuel & Hernández, 2007)	Hidráulicos. Biológicos. Ecohidrológicas. Ecohidráulico.	Revista Gestión y Ambiente. Artículo de investigación. 2007
Estimación de caudal ambiental mediante enfoques ecosistémicos para la cuenca del río Nare en el departamento de Antioquia, enmarcada en la metodología de ELOHA	Joanna Andrea Barrera Olarte. (Barrera, 2018)	Hidrológico. Biológicos. Social.	Universidad Nacional de Colombia. Tesis de Maestría. Bogotá, 2018
Evaluación De La Metodología Ifim-Phabsim Para La Determinación De Caudales Ambientales En Un Tramo De La Subcuenca Río Neusa	Omar Felipe Morales coronel. (Morales, 2017)	Biológicos. Hidráulico. Hidrológicos.	Universidad Santo Tomás Trabajo de grado. 2017
Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográficaca para la estimación de caudales ambientales	Emerson A. Parra Rodríguez. (Parra, 2013)	Hidrologicas. Hidraulicas Ecologicas. Economicas.	Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Tesis de Maestría. 2013

## 5. Metodología

En este capítulo se describirá la metodología que se usó para analizar algunas de las variables usadas para determinar caudales ambientales en páramo y alta montaña. Para esto se siguió un paso a paso basándose en la metodología propuesta por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (IDEAM & MADS, 2017).

Para realizar este análisis se definió y caracterizó la cuenca de interés, se caracterizó el régimen de caudales en la cuenca, se analizaron los servicios ambientales hídricos de la cuenca dando mayor enfoque a la calidad de agua y se analizaron las poblaciones de macroinvertebrados con el que posteriormente se construyeron curvas de idoneidad de hábitat. Posteriormente se, usaron métodos multivariados para determinar las preferencias a condiciones fisicoquímicas e hidráulicas de las comunidades acuáticas de macroinvertebrados y finalmente se proponen caudales ambientales (Figura 5-1).

**Figura 5-1:** Diagrama Metodología



### 5.1 Área de Estudio

El área de estudio es la microcuenca de la quebrada La Chorrera ubicada entre los municipios de Toca y Tuta en el departamento de Boyacá, cuya zona hidrográfica corresponde al nivel III de acuerdo a la zonificación Hidrográfica de Colombia realizada por el IDEAM. La delimitación de la microcuenca se realizó usando el software SWAT (Soil and Water Assessment Tool) el cual se basa en un Modelo de Elevación Digital (DEM). El DEM usado fue adquirido por el satélite ALOS desarrollado por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) y ofrece una resolución espacial de 12.5 metros. La delimitación de la red hídrica de la cuenca se realizó usando el DEM, junto con información

geográfica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Corpoboyacá e imágenes de Google Earth.

## 5.2 Caracterización de la Cuenca.

Se determinaron las principales variables morfométricas que caracterizan la cuenca de la quebrada la Chorrera tales como área, perímetro, elevación media, longitud del cauce principal, pendiente media, ancho o amplitud de la cuenca, factor de forma de Horton, coeficiente de compacidad, índice de alargamiento, relación de elongación, curva hipsométrica, orden de los cauces y densidad de drenaje. Aunque para representar procesos hidrológicos y determinar de una manera confiable y representativa los atributos de la microcuenca y sus procesos geomorfológicos, y a la vez permitir un buen rendimiento computacional, autores como (Zhang & Montgomery, 1994) recomiendan una resolución espacial de 10 metros, en este trabajo se usó la resolución espacial de 12.5 metros ofrecida por el sensor ALOS PALSAR por ser una fuente de datos gratuita y de buena calidad.

La cobertura vegetal de la cuenca junto con la pendiente media son los factores que mayor impacto tiene sobre el coeficiente de escorrentía de la cuenca (Chen et al., 2018). Por lo cual se determinaron las coberturas vegetales de la microcuenca usando una imagen satelital proveniente del satélite SENTINEL 2A lanzada por la Agencia Espacial Europea (ESA, 2015). A esta imagen se le realizó la Corrección Atmosférica DOS1 que transforma la reflectancia de la parte superior de la atmósfera en reflectancia superficial. Posteriormente se recortó con los límites de la cuenca, se combinaron sus bandas y se clasificaron las coberturas usando las bandas 11, 4 y 3. Estos procesamientos se realizaron usando la herramienta Semiautomatic Classification Plugins (SCP) del software Quantum GIS y el software Sentinel Application Platform (SNAP) de la ESA.

Para determinar los tipos de suelos que se presentan en la cuenca y sus características, se usó información secundaria proveniente del levantamiento de suelos de los páramos de Colombia a escala 1:25.000. Esta información se recortó con los límites de la cuenca, pero debido a que no hay información a escala 1:25.000 en toda el área de estudio, en las zonas donde no se existiera información a esta escala se usó la información proveniente del levantamiento general de suelos del Departamento de Boyacá a escala 1:100.000.

## 5.3 Caracterización del Régimen de Caudales

Se analizaron las series de tiempo de caudales medios diarios en para épocas de fenómeno del niño, niña y neutrales. Para esto se usó la información registrada en la estación limnimétrica CHORRERA\_LA con código IDEAM 24037590, la cual registró datos de caudal desde el 1 de febrero de 1992 hasta el 8 de diciembre del 2015 y actualmente se encuentra suspendida. La información fue organizada y procesada con el Software R Studio. Debido a que la cuenca solo está instrumentada cerca a la represa de La Copa y es necesario estimar los caudales en algunos puntos dentro de la cuenca, se implementó y calibró el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para obtener un

aproximado de caudales dentro de la cuenca en 16 puntos, SWAT es un modelo hidrológico de libre acceso que permite simular los caudales en cuencas hidrográficas. Para realizar la modelación, este modelo usa información de clima, suelos, topografía y, vegetación. Para este estudio se modeló el periodo comprendido entre 1 de febrero de 1992 hasta el 8 de diciembre del 2015 y se usó el software SWAT-CUP el cual permite calibrar varios parámetros del modelo SWAT, esta calibración se realizó de manera automática y se calibraron los parámetros: Número de curva de escorrentía SCS, Factor alfa de flujo base (días), Retraso del agua subterránea (días), Profundidad de agua en la profundidad, Densidad aparente húmeda, Capacidad de agua disponible en el suelo, Conductividad hidráulica, Conductividad hidráulica a través del fondo de estanques, Conductividad hidráulica efectiva en aluviones del canal principal, Conductividad hidráulica efectiva en aluviones de canales tributarios, Factor de compensación de la evaporación del suelo, Coeficiente de "renovación" del agua subterránea, Umbral de profundidad del agua en el acuífero poco profundo para que ocurra la "renovación" (mm), Fracción de percolación de acuíferos profundos y Retraso de escorrentía superficial

## 5.4 Evaluación de la Funcionalidad Ecológica

Se seleccionaron 16 tramos dentro de la red hídrica en donde se identificaron sus características topográficas y nodos de confluencia sobre los cuales se ubicaron transectos donde se observarán cambios que pudieran afectar a las especies acuáticas de la zona o que pudieran representen barreras para el transporte de nutrientes, sedimentos o materia orgánica, y que además que fueran representativos en altura, cobertura y morfología de la zona. En estos puntos se llevaron a cabo el levantamiento de secciones transversales para determinar caudal y velocidad, y el muestreo de macroinvertebrados. Este procedimiento se llevó a cabo tanto en época húmeda (noviembre) como en época seca (febrero).

Para evaluar la funcionalidad ecológica se determinó riqueza y abundancia de macroinvertebrados en las dos épocas de muestreo (seca y húmeda). Este procedimiento se llevó a cabo en dos fases. En una primera fase se muestrearon los macroinvertebrados presentes en los tramos, La segunda fase se llevó a cabo en laboratorio donde se determinó las poblaciones, riqueza (número de familias y/o géneros) y se determinaron el Índice de Diversidad de Shannon y el Índice de Dominancia de Simpson. Estos indicadores fueron comparados entre épocas de muestreo, para lo cual se usaron test estadístico de normalidad, una vez determinada la normalidad de los datos se aplicó la prueba paramétrica t de Student para datos normales y la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis para datos no normales, y después se realizó la comparación entre épocas de muestreo para las variables hidráulicas y químicas.

Para evaluar el hábitat disponible para macroinvertebrados, se analizó la correlación entre abundancia (número de individuos) con las variables hidráulicas (velocidad, profundidad y caudal), se determinó el rango de valores alcanzado en cada época de muestreo y se construyeron las curvas de idoneidad de hábitat para las familias y géneros más abundantes. Para la construcción de las curvas de idoneidad de hábitat se dividió en

intervalos el rango observado en cada variable hidráulica por taxa y se calculó el valor promedio de la abundancia entre el correspondiente intervalo. Seguidamente se realizó un gráfico de dispersión entre los valores promedios de la abundancia y los intervalos de las variables hidráulicas, posteriormente se ajustó una curva polinomial de segundo orden a esta gráfica y por último se normalizó para poder expresar el índice de idoneidad entre cero y uno de tal manera que un índice de idoneidad de uno indique una condición hidráulica que favorece el hábitat de los macroinvertebrados. Las fases de campo y de laboratorio se describen a continuación:

### **Primera fase**

Para la colecta del material biológico se utilizó el método de muestreo con red Surber (muestreo cualitativo) (Surber, 1937) (Meza-S et al., 2012) (Rojas-Sandino et al., 2018), el cual consta de dos marcos cuadrados de 30.5 cm unidos por bisagras en cada uno de los lados, presenta una red de 69 cm de largo con apertura de malla de 125  $\mu$ m.

En cada sitio de muestreo se midieron características fisicoquímicas (pH, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad), sustrato (limo, arena, cascajo, canto rodado, roca, laja, hojarasca, troncos entre otros), y su ubicación espacial en coordenadas geográficas. Posteriormente se seleccionó un tramo de 30 m representativo de la corriente siguiendo los protocolos de colecta de sistemas acuáticos y de muestreo de fauna ictiológica en ríos.

Para la toma de muestra, se colocó la red Surber sobre el fondo del curso de agua, paralelo a la corriente, con la parte de la red corriente abajo. Para iniciar la colecta se inició de aguas abajo del área seleccionada hacia aguas arriba. Una vez colocada se froto ligeramente las rocas, piedras y sustratos con la mano durante un minuto, con el fin de desalojar a los organismos que viven en el fondo y que sean arrastrados por la corriente y capturados en la red. En promedio se realizaron 6 colectas en cada tramo lo que equivale a una muestra. Dicho procedimiento se realizó para cada sitio de muestreo, la muestra fue almacenada en bolsas plásticas de calibre dos con alcohol al 95% para preservarla. Por último, el material colectado se transportó al laboratorio en neveras refrigeradas.

### **Segunda fase**

Las colectas de macroinvertebrados realizadas en los sitios se almacenaron en tarros de 500 ml con alcohol al 96% siguiendo las recomendaciones de (Roldán & Ramirez, 2008). Se realizaron cuadrantes en bandejas para la separación de la muestra. Para el conteo e identificación se tomó el espacio equivalente a dos cuadrículas de un total de 8 para el área total de la bandeja, para así estimar la abundancia de los grupos taxonómicos (Stark et al., 2001). La muestra separada se procesó bajo el estereoscopio usando cajas de Petri. Se delimitaron cuatro cuadrantes y la revisión de la muestra fue mediante barrido por duplicado, el cual se llevó a cabo en cada cuadrante hasta abarcar la totalidad del área de las cajas. Los individuos se separaron en viales a nivel de orden y morfotipos. La determinación taxonómica con material especializado hasta el nivel de familia se realizó con la ayuda de un estereoscopio y la muestra restante se almaceno para posteriores estudios (Roldán & Ramirez, 2008), (Springer, 2014), (Dobson, 2013), (Sundermann et al.,

2007). Para lo cual, los organismos se conservaron en alcohol al 96% a excepción de los individuos pertenecientes a Oribatidae y Acarii para lo cual se usó solución Koenike (Cómbita, 2013)

## 5.5 Servicios Ambientales Hídricos

Se determinaron los servicios ecosistémicos provistos por la cuenca La Chorrera haciendo énfasis en la calidad del agua requerida para mantener y permitir los usos actuales y potenciales del recurso hídrico. Para lo anterior se determinó el estado actual de intervención y se analizó la presión antrópica de actividad agropecuaria sobre la cuenca y su capacidad de regular y retener agua, para lo cual se usó el índice de retención y regulación hídrica propuesto por el IDEAM.

## 5.6 Análisis Calidad de Agua

Para determinar los criterios de calidad de agua en función de las necesidades ecosistémicas presentes en el momento de muestreo para época seca y húmeda, se realizó un muestreo puntual en 16 sitios representativos de diferentes estados de intervención y conservación dentro de la cuenca en temporada de lluvias y en temporada seca. En cada punto se determinó la demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno Total, Fósforo Total, Coliformes Totales, E. Coli, Oxígeno Disuelto, pH, Conductividad Eléctrica (C.E).

## 5.7 Análisis Multivariados

Las diferentes variables hidrológicas, de calidad de agua y de población de macroinvertebrados se analizaron por medio del método estadístico multivariado de Análisis de Correspondencia Canónica (CCA), Análisis de Correspondencia Múltiple (MCA) y Análisis de Componentes Principales (PCA) para determinar cuáles son las preferencias de hábitat de los macroinvertebrados con miras a proponer un caudal ambiental.

El propósito principal del PCA es reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos multivariado y, además, iluminar su interpretación identificando un número menor de variables que, en cierto sentido, resumen el conjunto más grande. Antes de determinar el PCA se debe definir la matriz de coeficientes de correlación derivados del conjunto de datos original. El método a veces se usa cuando los coeficientes de correlación no se han calculado a partir de variables métricas. Tal análisis no es válido, pero, a pesar de esto, el método puede proporcionar un resumen útil, aunque aproximado, de la estructura de los datos.

El CCA es un método fue desarrollado por Ter Braak (1986) para relacionar la composición de la comunidad con la variación conocida del entorno. Esta técnica es una extensión del análisis de correspondencia (promedio recíproco). Para realizar el CCA se agruparon los

datos según la zona donde fueron muestreados (Páramo, transición y agricultura). Para cada grupo de datos se le realizó el CCA comparando la abundancia de macroinvertebrados con las variables fisicoquímicas e hidráulicas. El CCA genera un diagrama de ordenación en el que los puntos representan especies y sitios, y los vectores representan variables ambientales. Dicho diagrama muestra los patrones de variación en la composición de la comunidad que pueden explicarse mejor por las variables ambientales y también visualiza aproximadamente los "centros" de las distribuciones de especies a lo largo de cada una de las variables ambientales. Dichos diagramas resumen efectivamente las relaciones entre la comunidad (Braak, 1986).

El MCA se ocupa de mostrar las categorías de más de dos variables discretas, y es útil para datos categóricos. Esto se logra definiendo variables ficticias para cada categoría y expresando los datos en forma de una matriz indicadora de casos por variables. El MCA transforma la asociación entre categorías de variables discretas en coordenadas en un espacio multidimensional, asigna valores de escala a las categorías de las variables discretas y maximiza la varianza de esos puntajes para encontrar las asociaciones entre las variables y la proximidad entre los individuos. Los puntos en la misma dirección desde el origen están altamente asociados. Los puntos alrededor del origen representan la media, mientras que los puntos alejados del origen se desvían de la media (Dungey et al., 2018).

## 5.8 Caudales Ambientales

Los puntos muestreados fueron agrupados según su ubicación en puntos ubicados en zona de páramo, puntos ubicados en zona de transición entre páramo y agricultura y puntos ubicados en zonas de agricultura. Usando el modelo hidrológico calibrado se estimó en cada uno de estos puntos el régimen hidrológico. Estos caudales se naturalizaron restándole los caudales el caudal otorgados por las concesiones de agua presentes en la cuenca. Posteriormente se propuso el caudal ambiental usando la metodología hidrológica de Q90 (NGPRP) y finalmente, basándose en la guía metodológica propuesta por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible se tuvieron en cuenta las variables de calidad de agua, concesiones y preferencia de hábitat para macroinvertebrados para proponer caudales ambientales con un enfoque holístico.

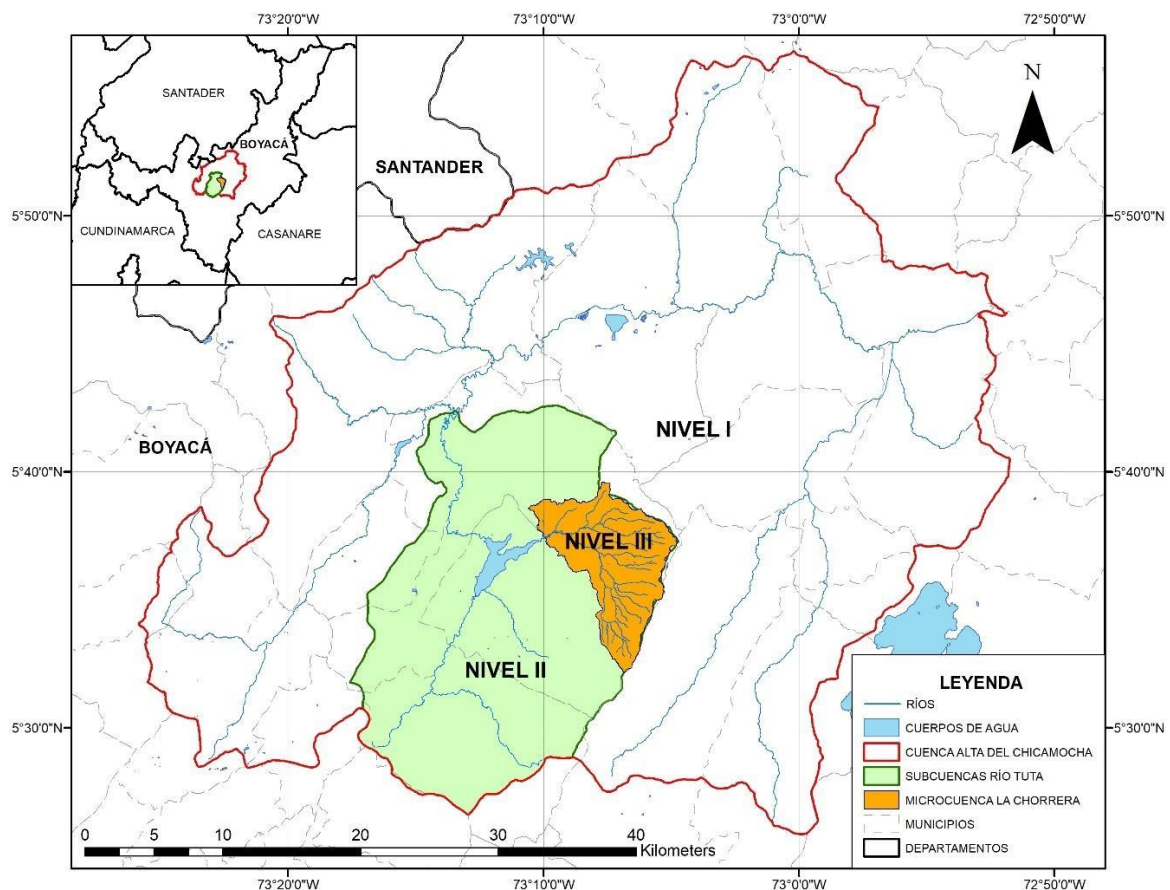


La microcuenca del río la Chorrera entrega sus aguas al embalse de La Copa siendo la segunda microcuenca de mayor tamaño que aporta agua al embalse. El río La Chorrera

tributa importantes caudales en épocas de lluvias, pero debido al estado de intervención que presenta la cuenca los caudales disminuyen notoriamente durante los períodos secos (Gamboa et al., 2015). En la zona alta de la cuenca del río la Chorrera se encuentra ubicado parte del páramo la Cortadera que se ilustra en la Figura 6-1 el cual fue declarado Parque Regional Natural por medio de la Resolución 1814 de 2015 del Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

Según (CORPOBOYACÁ, 2017) el código que identifica a la microcuenca del río La Chorrera dentro del Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) de Colombia es 2403010803, esto indica que la microcuenca pertenece a el área Hidrográfica: Magdalena-Cauca [2], Zona Hidrográfica: Sogamoso [4], Subzona Hidrográfica: Río Chicamocha [03], Unidad Hidrográfica Nivel I: Cuenca Alta del Río Chicamocha [01], Unidad Hidrográfica Nivel II: Río Tuta y Unidad Hidrográfica Nivel III: Río La Chorrera como (Figura 6-2).

**Figura 6-2:** Unidad hidrográfica de la cuenca La Chorrera.



### 6.1.2 Morfometría de la Cuenca

La microcuenca del río La Chorrera tiene un área de 66.80 km<sup>2</sup> (6676.4 ha), perímetro de 59.6429 km, elevación media de 3050.37 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m), con una mínima de 2962 metros, una máxima 3825 metros, y una pendiente media de 17.63%.

Según Horton (1932). la longitud que se utiliza no es necesariamente la longitud máxima, pero debe medirse desde un punto en la línea divisoria de aguas frente a la cabecera de la corriente principal, por lo cual en el presente trabajo se usó la longitud del eje del cauce principal, y su medida es de 14.5 Kilómetros.

El ancho o amplitud de la cuenca ( $W$ ) es de 4.6 Km e indica cual es la superficie de la cuenca por unidad de longitud. Este valor siempre será superior a 1. Entre menor sea el valor de  $W$  más elongada será la cuenca y se define como la relación entre el área ( $A$ ) y la longitud de la cuenca ( $L_b$ ).

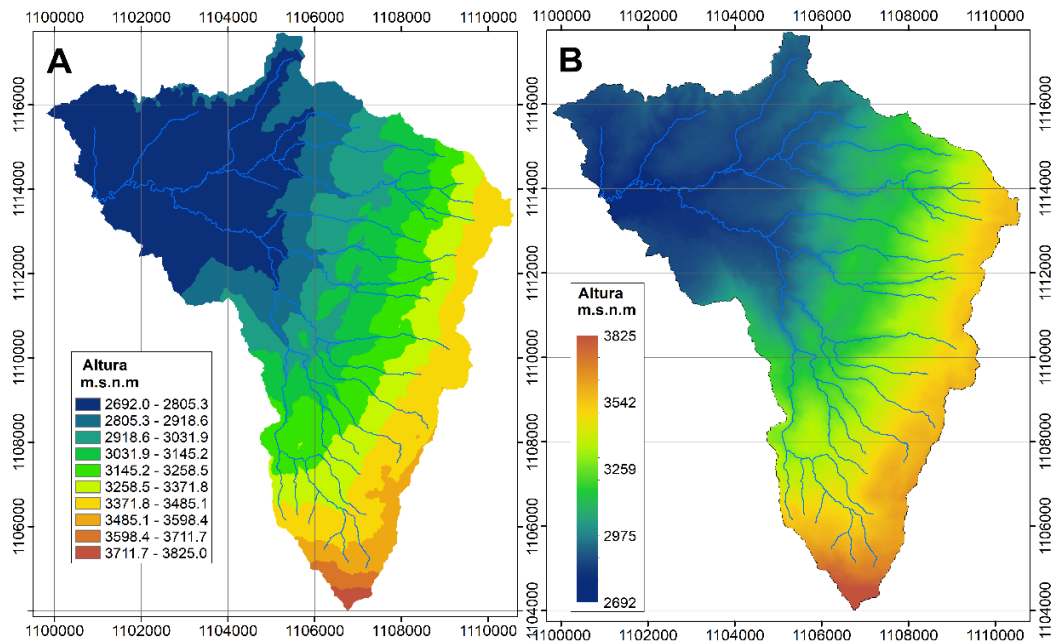
El factor de forma de Horton ( $k_f$ ) es de 0.3177, Según Horton (1932) el factor de forma es la relación entre el ancho ( $W$ ) y la longitud de la cuenca de drenaje ( $L_b$ ). El factor de forma permite comparar cuencas hidrográficas e intenta medir, al igual que ( $W$ ), que tan elongada es. Las cuencas que presentan un factor de forma bajo son menos susceptibles a presentar crecientes que las cuencas con igual área, pero con mayor factor de forma, lo cual indica que la cuenca de estudio tiende a ser achatada con un río principal corto, donde es posible que se concentre la escorrentía de una lluvia intensa, creando crecidas fácilmente.

El coeficiente de compacidad ( $k_c$ ) determina la relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de una circunferencia con un área igual a la de la cuenca. A medida que este coeficiente se acerca a 1 la cuenca se asemejará más a una circunferencia presentando una superficie de captación más pequeña, lo cual aumentará su tendencia a crecientes súbitas. Para el caso de la microcuenca La Chorrera el coeficiente de compacidad es de 2.05, lo cual indica que la microcuenca tiene forma rectangular-oblonga, por lo cual indica que la cuenca presentará una tendencia a concentrar pocos volúmenes de agua (Gaspari et al., 2012).

La Razón de elongación relaciona el diámetro de círculo asociado con la longitud de la cuenca. A medida que este valor sea menor a 1 indicará que la forma de la cuenca es alargada, Para la microcuenca La Chorrera el valor de  $R_e$  es de 0.6358, lo que indica que la forma de la cuenca tiende a ser alargad, presentando menor retardo entre el momento de una precipitación y el momento de la crecida.

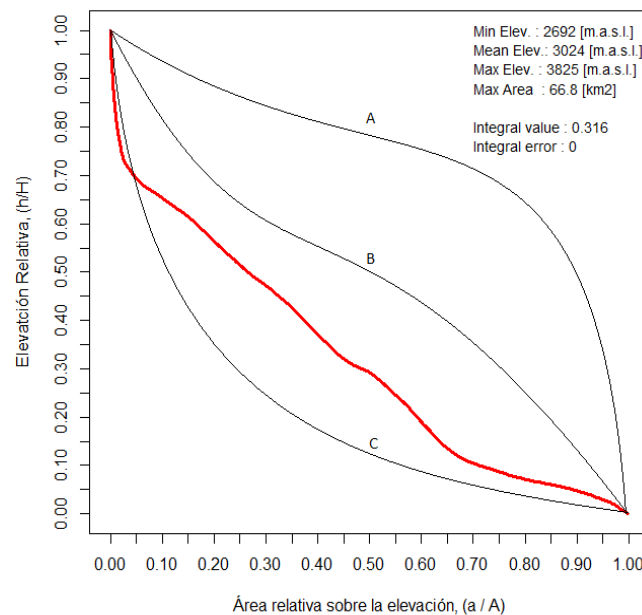
La Curva Hipsométrica indica el grado de madurez de una cuenca evaluando los ciclos erosivos y la etapa evolutiva en la que se encuentre esta, para esto se debe definir el área que se ubica por encima de una determinada altura (Figura 6-3), en Tabla 6-1 se presentan los valores de la curva hipsométrica en la Chorrera.

**Figura 6-3:** A) cambios en área por alturas de La Chorrera B) Modelo de elevación Digital de La Chorrera



Fuente: autor

**Figura 6-4:** Curva Hipsométrica de la Chorrera.



Fuente: Autor

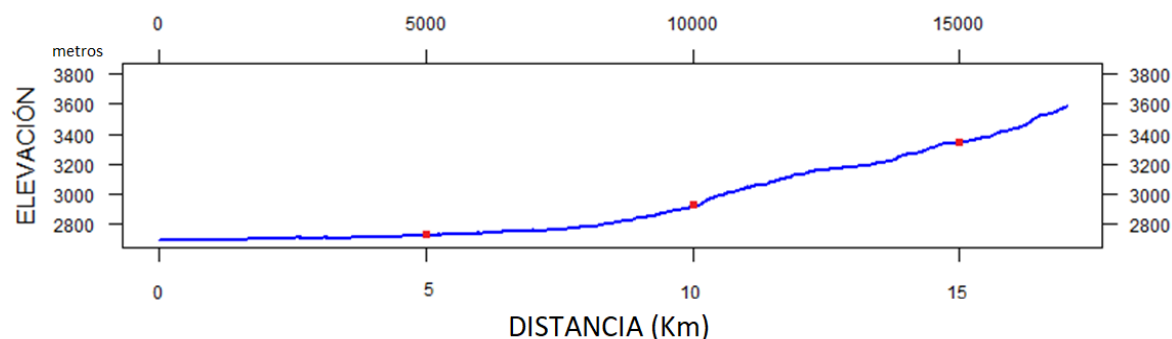
En la curva hipsométrica de la microcuenca La Chorrera se observa que el 2.48% de la cuenca presenta relieves accidentados y se ubican en la parte alta. En la parte media de la cuenca se presenta relieves suaves a lomados que representa el 71.1% del área, y en la parte baja se presenta relieves planos representando el 26.05% de esta (Figura 6-4). El comportamiento de la curva corresponde a una cuenca madura (etapa equilibrada) en transición a vieja (etapa erosionada).

**Tabla 6-1:** Valores de la curva hipsométrica en la Chorrera.

Color	Min (Km <sup>2</sup> )	Max (Km <sup>2</sup> )	Promedio	Rango	Área	Área Acumulada	%	% Acumulado
	2692	2805.3	2748.65	113.3	8.10	8.10	12.13	12.13
	2805.3	2918.6	2861.95	113.3	19.11	27.21	28.62	40.75
	2918.6	3031.9	2975.25	113.3	7.60	34.80	11.38	52.13
	3031.9	3145.2	3088.55	113.3	6.64	41.45	9.95	62.08
	3145.2	3258.5	3201.85	113.3	6.97	48.41	10.44	72.51
	3258.5	3371.8	3315.15	113.3	2.18	50.59	3.26	75.78
	3371.8	3485.1	3428.45	113.3	7.24	57.83	10.84	86.61
	3485.1	3598.4	3541.75	113.3	8.08	65.91	12.11	98.72
	3598.4	3711.7	3655.05	113.3	0.57	66.48	0.85	99.58
	3711.7	3825	3768.35	113.3	0.28	66.76	0.42	100.00
TOTAL					66.764		100	

El cauce principal de la cuenca la chorrera tiene una longitud de 17.06 km y su pendiente media es de 5.21%, aumentando a 9.1% después del kilómetro 8.5 como se ilustra en Figura 6-5. La zona ubicada de por debajo de los 2800 m.s.n.m. presentan relieves planos, que junto al aumento del meandro no permite la evacuación rápida del agua, aumentando las posibilidades de prestarse una inundación en la zona baja de la cuenca ante precipitaciones fuertes.

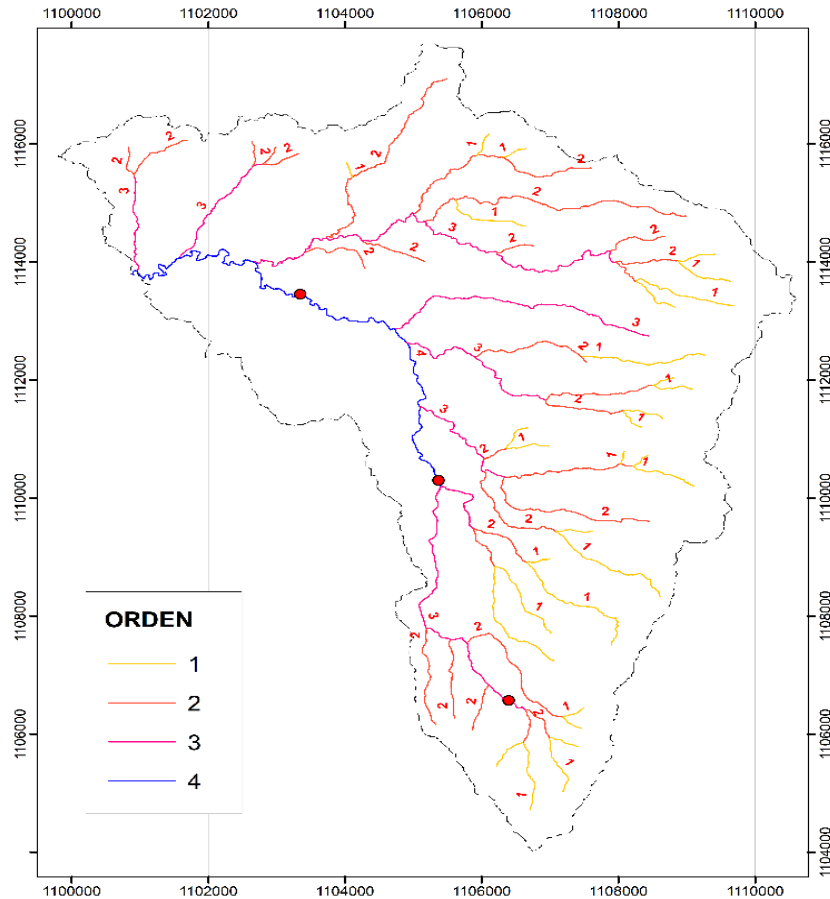
**Figura 6-5:** Perfil de elevación del cauce principal en la cuenca La Chorrera.



Según la clasificación de Strahler/ Horton la cuenca la chorrera tiene un orden de corriente 4 (Figura 6-6). Este orden es común encontrarlo en las cuencas de las zonas altoandinas

y para el caso de la cuenca La Chorrera la parte alta de la cuenca presenta ordenes bajos que pueden mostrar descargas súbitas durante una tormenta, mientras que en la parte baja de la cuenca el orden es mas alto y es más probable que la respuesta hidrológica sea más lenta.

**Figura 6-6:** Orden de la red de drenaje en la cuenca La Chorrera.



La densidad de corrientes se define como la longitud de corrientes por unidad de área, y determina que tan bien o mal drenada se encuentra una cuenca y en función de esto que tan rápido respondería a una tormenta (Fuentes, 2004). Para el caso de La Chorrera la densidad de drenaje es 1.58, lo cual indica que tiene una baja densidad de drenaje, indicando que es una cuenca cuyos materiales parentales de suelo son duros, resistentes a la erosión y poco permeables (Aparicio, 1992). Esta condición se observó en la parte alta de la cuenca donde se presentan en su mayoría suelos poco profundos y/o descubiertos, pero en su parte baja presenta una llanura donde se han depositado materiales de erosión y sus materiales son más blando y permeables, lo cual hace que en la parte de páramo la cuenca presente una respuesta hidrológica rápida con picos de caudal altos. Una vez llega a la parte de llanura la respuesta hídrica se hace más lenta y los picos de caudales se hacen más bajos. El resumen de índices morfológicos de la cuenca se resume en la Tabla 6-1.

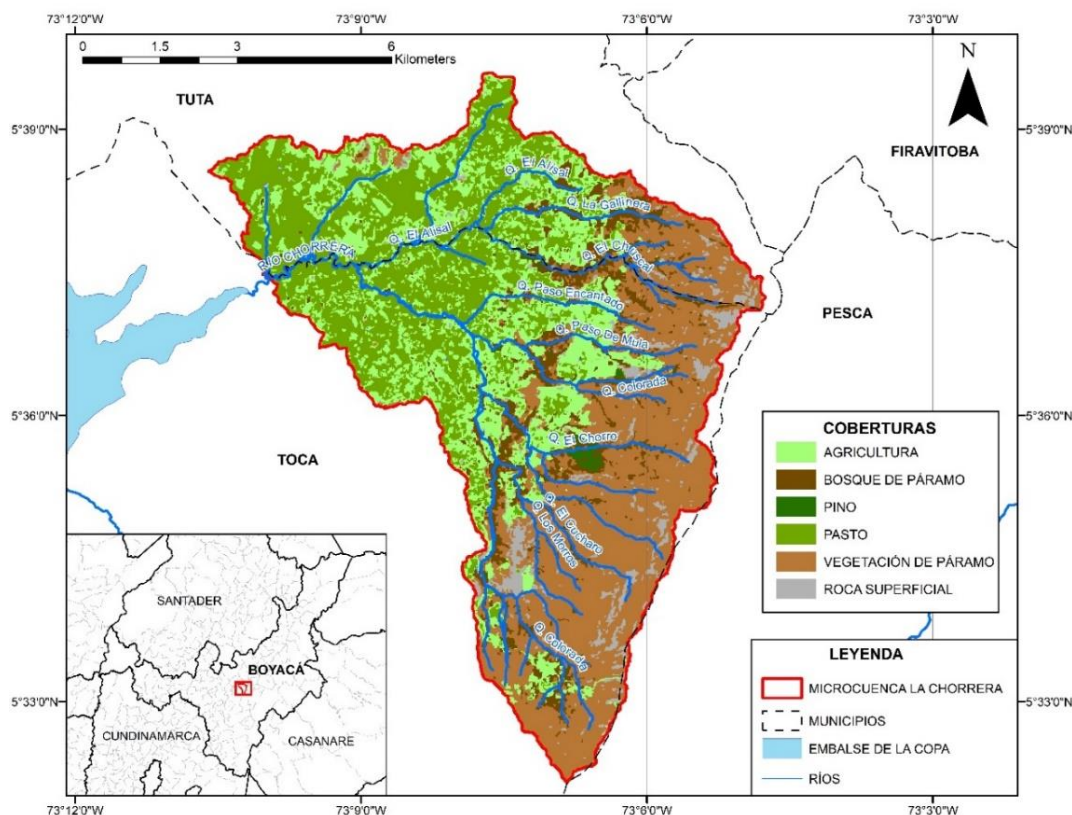


**Tabla 6-2:** Resumen de la morfometría de la Chorrera

Área (Km <sup>2</sup> )	Perímetro (Km)	Elevación Media (m.s.n.m.)	Elevación Mínima (m.s.n.m.)	Elevación Máxima (m.s.n.m.)	Pendiente Media (%)	Orden de Corriente
66.8041	59.6429	3050.37	2692	3825	17.63	4
Longitud eje Cauce principal (Km)	Longitud Cauce principal (Km)	Ancho (W)	Factor de Forma (Kf)	Coeficiente de Compacidad (Kc)	Razón de Elongación (Re)	Densidad de Drenaje
14.5	17.06	4.6	0.3177	2.05	0.6358	1.58

### 6.1.3 Coberturas Vegetales de la Cuenca

Las coberturas vegetales de la cuenca se determinaron usando imágenes satelitales provenientes del sensor Sentinel 2A, el cual tiene un instrumento óptico de alta resolución, con 13 bandas que van desde 443 nm a 2190 nm y una resolución espacial de 10 m a 60 m. La verificación de las coberturas se realizó con visitas en campo y se tomó información adicional de GoogleEarth®.

**Figura 6-7:** Coberturas Vegetales de La Chorrera

La escena usada fue capturada por el sensor el día 17 de marzo del 2018 y su ID es S2A\_MSIL1C\_20180317T151701\_N0206\_R125\_T18NYM\_20180317T184033. Una vez clasificada la imagen como se ilustra en la Figura 6-7, se determinó que en la cuenca se presentan 34.85 ha de pino, 261.71 ha de roca superficial o suelos poco profundos, 695.29 ha de bosque de páramo, 1567.21 ha de agricultura (Principalmente cultivos de papa, maíz, cebolla y fresa), 1840.83 ha de pastos para ganadería y 2276.31 ha de vegetación de páramo (Tabla 6-3).

**Tabla 6-3:** área de las coberturas vegetales en la Chorrera.

COBERTURAS	ÁREA (hectáreas)
Pino	34.85
Roca superficial o suelos poco profundos	261.71
Bosque de Páramo	695.29
Agricultura	1567.21
Pasto	1840.83
Páramo	2276.31

#### 6.1.4 Suelos de la Cuenca

En la cuenca se presentan, según información cartográfica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 13 unidades de suelo a escala 1:25.000 en zona de páramo y 7 unidades de suelo a escala 1:100.000 en el resto de cuenca, como se ilustra en la Figura 6-8. Las características de cada Unidad Cartográfica de Suelos (UCS) se pueden observar en los ANEXOS.

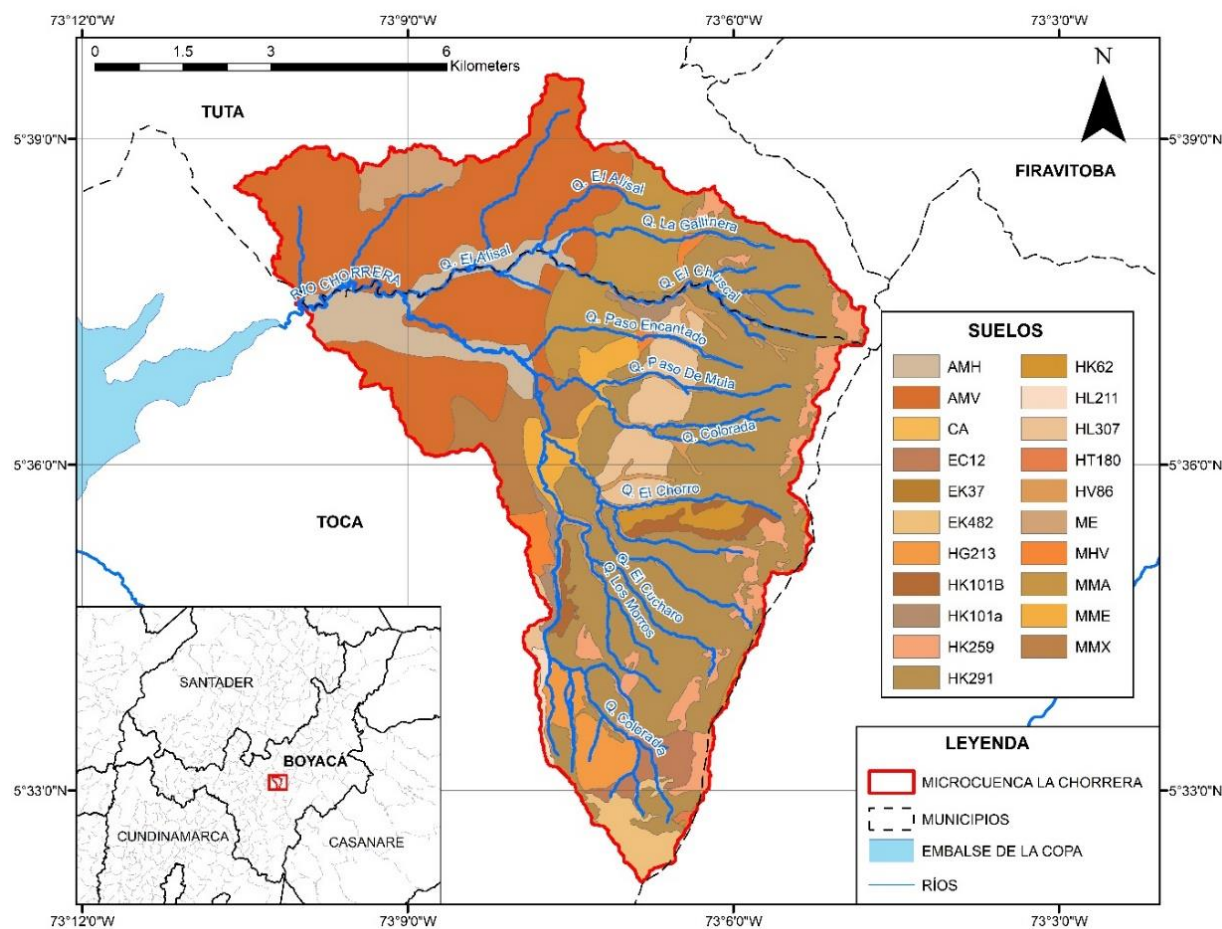
**Tabla 6-4:** áreas de las Unidades Cartográficas de Suelos en la Chorrera.

UCS	ÁREA	UCS	ÁREA
AMH	383.67	HK62	87.91
AMV	1674.43	HL211	23.59
CA	0.12	HL307	290.56
EC12	94.82	HT180	5.73
EK37	1.09	HV86	255.72
EK482	116.14	ME	123.13
HG213	159.26	MHV	69.30
HK101a	57.81	MMA	442.92
HK101B	89.26	MME	159.50
HK259	280.65	MMX	240.31
HK291	2120.51		



Las UCS que se presentan en mayor área fueron la HK291 con 2120.5 ha, esta unidad se caracteriza por suelos moderadamente profundos, bien drenados, textura franca arcillo limosa, y la AMV con 1674.4 ha que se caracteriza por presentar suelos profundos y muy profundos, bien drenados, de texturas franco finas, mientras que las unidades que se presentaron en menor proporción fueron la HT180 con 5.73 ha, EK37 con 1.09 ha y los cuerpos de agua con 0.12 ha (Tabla 6-4).

**Figura 6-8:** Suelos de la Microcuenca la Chorrera.

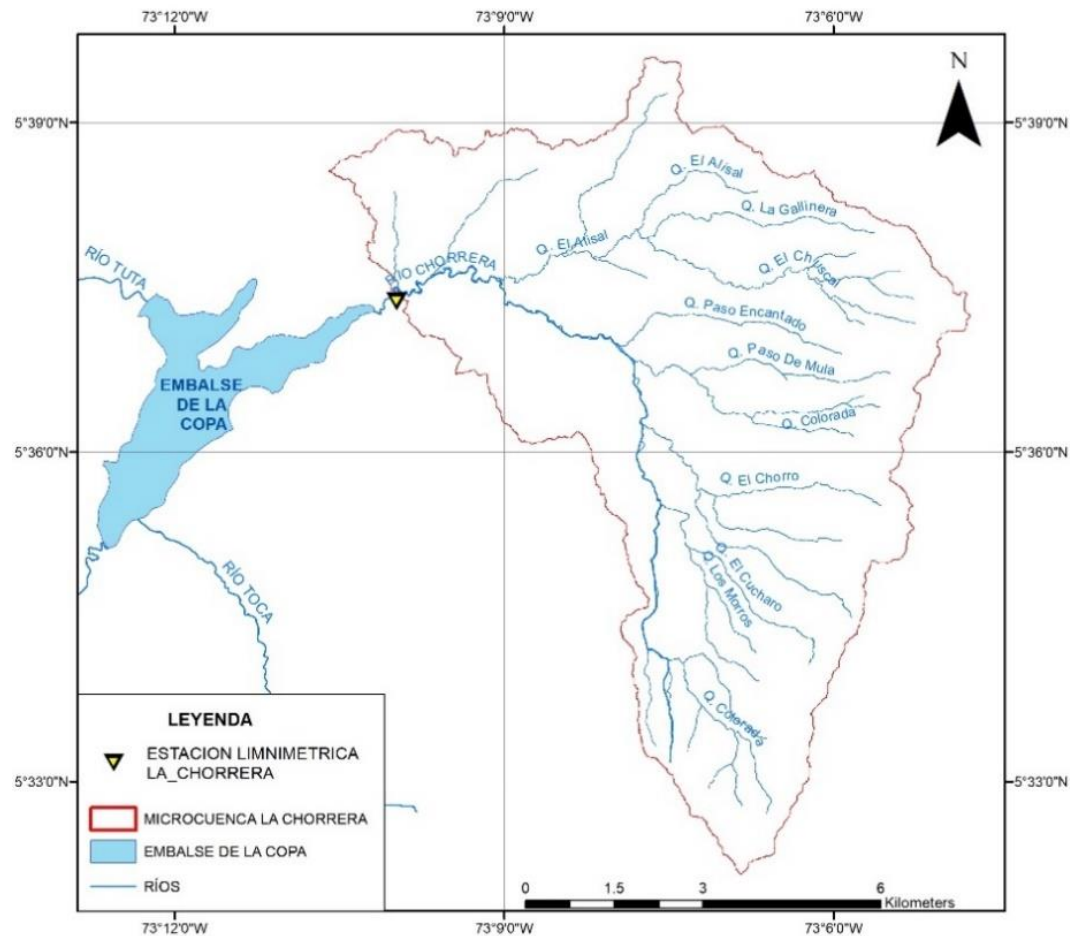


## 6.2 Caracterización del Régimen de Caudales.

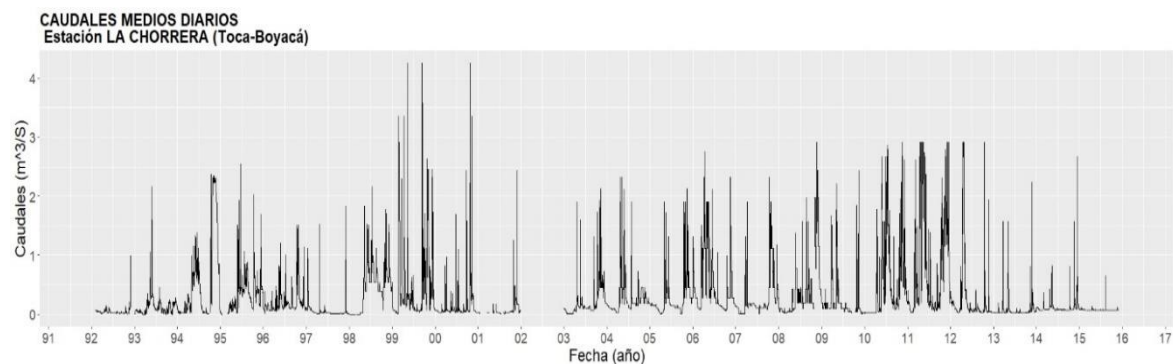
Para la caracterización hidrológica de la microcuenca La Chorrera se usó la serie de caudales medios diarios medidos en la estación Limnimétrica LA CHORRERA, con código IDEAM 24037590, ubicada en las coordenadas 5°37'22.90"N y 73° 9'59.00"W sobre el río La Chorrera antes de desembocar en la represa La Copa en el municipio de Toca (Boyacá) (Figura 6-9). La estación fue instalada el 14 de marzo de 1991 y fue suspendida el 22 de febrero del 2019, existen registros de datos desde el 1 de febrero de 1992 hasta

el 8 de diciembre del 2015 con excepción del año 2002 para un total de datos de caudal medio diario de 23 años (Figura 6-10).

**Figura 6-9:** Ubicación de la estación Limnimétrica La Chorrera.



**Figura 6-10:** serie de caudales registrados por la estación La Chorrera

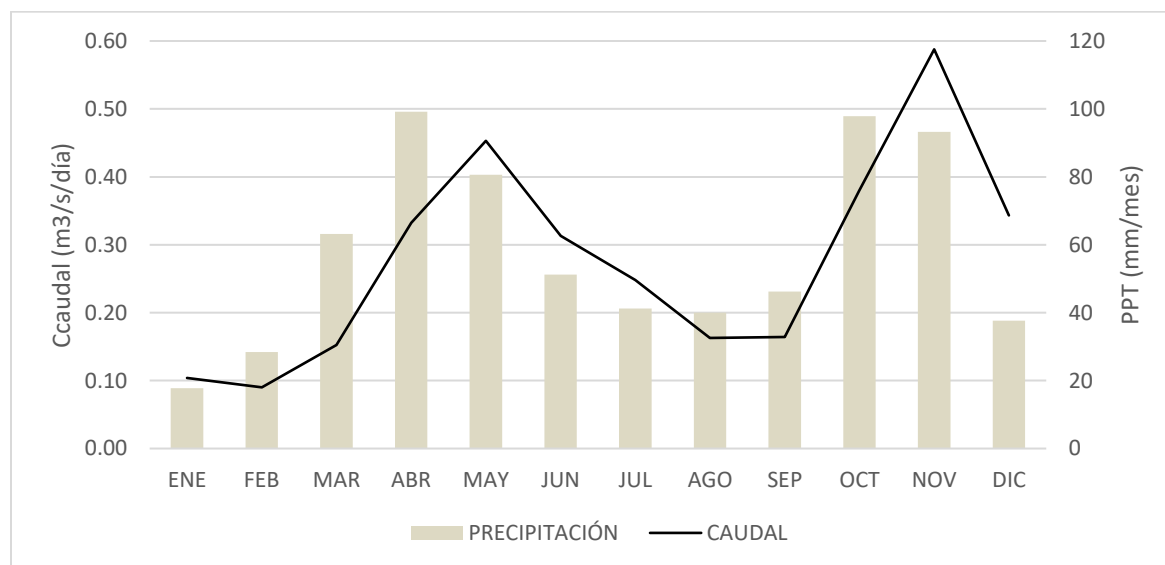


En la serie de tiempo de caudales de la estación La Chorrera se puede observar que entre los años 1999 y 2001 se presentaron picos históricos de caudales. Esto coincide con el

fenómeno de la niña que se presentó esa misma época. Estos datos extremos no se volvieron a presentar en el resto de la serie de tiempo a pesar de presentarse otras épocas con fenómeno de la niña.

La microcuenca La Chorrera posee un régimen de caudal bimodal, presentando dos épocas de caudales altos entre los meses de abril a junio y entre los meses de octubre a diciembre, con picos en los meses de mayo y noviembre; y dos periodos con caudales bajos entre los meses de enero a marzo y de julio a septiembre (Figura 6-11), este comportamiento coincidiendo con las precipitaciones reportado por la estación EL GARROCHO ubicada dentro de la cuenca la Chorrera.

Figura 6-11: caudales promedio diarios/mes y Precipitaciones promedios diarios/mes



Debido a que Colombia se encuentra ubicada en la zona intertropical del planeta, tanto el régimen de precipitación como el de caudales se ve afectado por fenómenos climáticos a escala global asociados a la variabilidad climática como el fenómeno del Niño-Oscilación del Sur – “ENOS”. Por tal motivo es necesario considerar la variabilidad de los caudales influenciada por estos fenómenos climáticos. En este sentido las series de caudales se clasificaron en años neutro o normales, años húmedos o niña y años secos o niño. Para esto se usó el Índice Oceánico El Niño (Oceanic Niño Index, ONI) ofrecido por el NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Este índice se basa en umbrales de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  de la temperatura de la superficie del mar para fines históricos. El NOAA representa los periodos húmedos (fenómenos de la niña) en color azul y los periodos secos (fenómeno del niño) son representados en color rojo (Tabla 6-5).

**Tabla 6-5:** Índice Oceánico El Niño (Oceanic Niño Index, ONI)

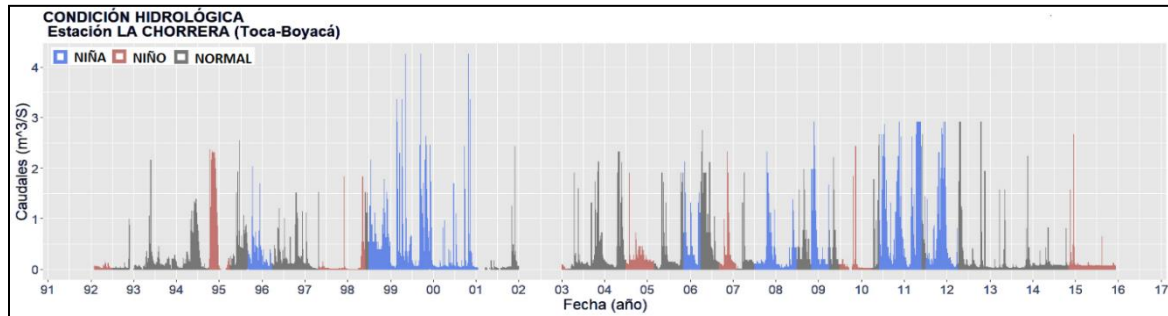
Year	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
1992	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1
1993	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	1	1.1
1995	1	0.7	0.5	0.3	0.1	0	-0.2	-0.5	-0.8	-1	-1	-1
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.4
1998	2.2	1.9	1.4	1	0.5	-0.1	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6
1999	-1.5	-1.3	-1.1	-1	-1	-1	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	0	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.3	0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1	1.3	1.6
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6

Fuente: NOAA (Cold & Warm Episodes by Season)

El mismo sistema de color (azul y rojo) usado por NOAA para representar los periodos húmedos y secos se ajustó para la serie de caudales de La Chorrera, con lo cual se pudo observar que se presentan dos temporadas fuertes de fenómeno de la niña. La primera se presentó de mediados de 1998 hasta comienzos del 2001, y la segunda de mediados del 2010 hasta comienzos del 2012. Además de estas temporadas también se presentaron épocas húmedas en menor intensidad entre los años 1995 y 1996, entre finales del 2005 hasta comienzos del 2006 y entre mediados del 2007 hasta mediados del 2008. Respecto a las temporadas secas se presentaron 8 épocas de baja intensidad, siendo las de mayor

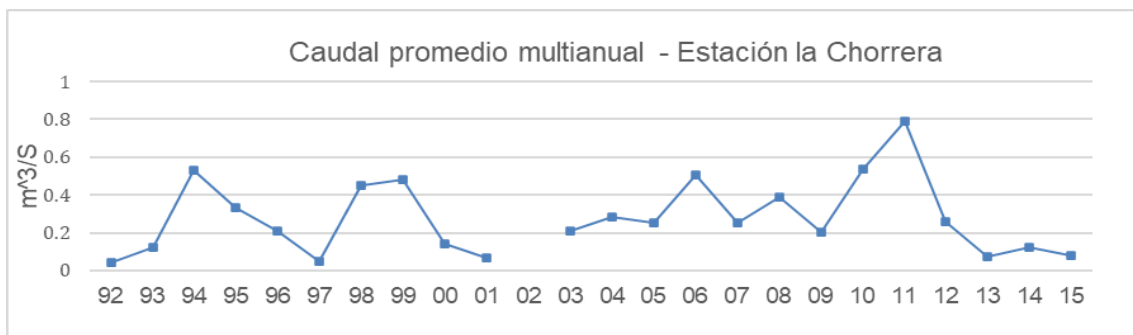
intensidad la observada entre mediados de 1997 hasta mediados de 1998 y la observada al final de la serie de tiempo desde finales del 2014 hasta el 2015 (Figura 6-12). Para finales del año 1994 se presentó un periodo de caudales altos que se mantuvieron por casi un mes que no coincide con el fenómeno del niño presente en esa época, por lo que no se tuvieron en cuenta para el análisis de caudales.

**Figura 6-12:** Caudales en épocas niño, niña y neutrales en la estación LA CHORRERA.



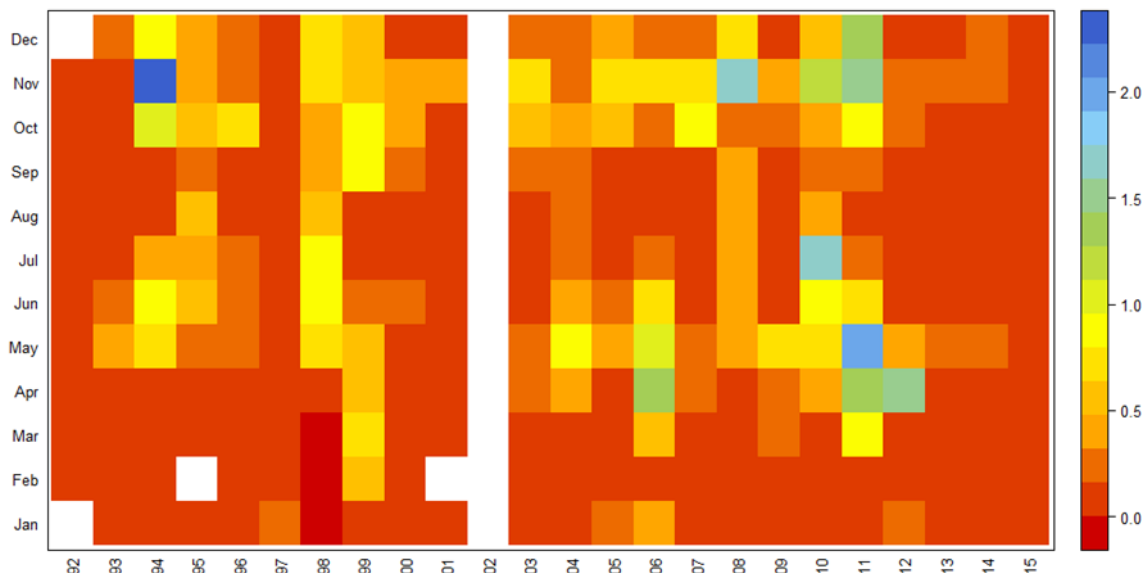
Fuente: Autor

**Figura 6-13:** Caudal promedio multianual – Estación LA CHORRERA.

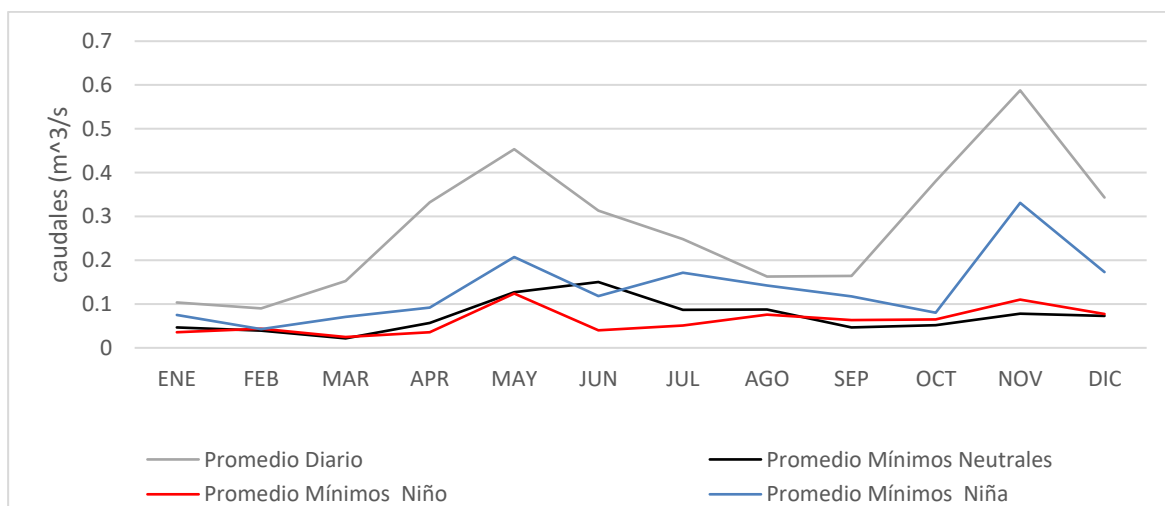


Observando los promedios multianuales de caudales se observa que las temporadas que presentaron fenómeno de La Niña más intensos coinciden con épocas picos del caudal promedio multianual, a excepción de la época Niño comprendida entre finales de 1994 y comienzos de 1995, donde se presentan picos de lluvias (Figura 6-13), viendo los promedios mensuales de esa época se observa que a finales del año 1994 se presentó el mes con más lluvias promedio de la serie (Noviembre). Este mes, según el ONI, fue mes Niño, y a comienzos de 1995 hasta abril de 1998 se presenta una época seca fuerte al igual que desde comienzos de 2012 hasta finales del 2015 (Figura 6-14).

La estación La Chorrera registró en promedio al día un caudal de  $0.281 \text{ m}^3/\text{s}$  y en promedio  $8.45 \text{ m}^3$  al mes, con picos importantes en noviembre de 1994, 2008, 2010 y 2011, julio de 2010, abril, mayo y diciembre de 2011 y abril del 2012, Los años que presentaron más meses con caudal promedios altos fueron 1994, 1998, 1999, 2006, 2008, 2010 y 2011, mientras que los años con menor caudal promedio mes fueron 1992, 1993, 1997, 2001, 2013, 2014 y 2015.

**Figura 6-14:** Caudales promedios mensuales estación la Chorrera.

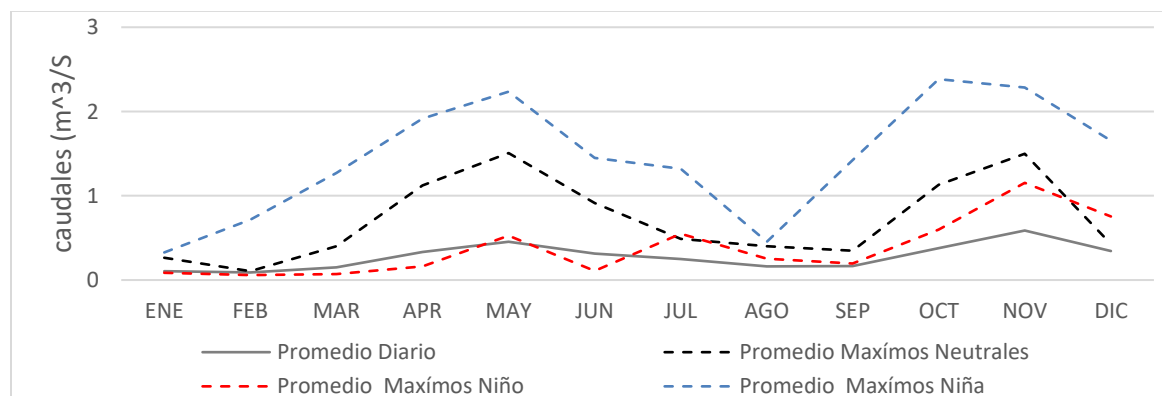
Los caudales mínimos promedios para épocas Niño, Niña y neutra se comportaron muy similares con excepción del mes de noviembre de la época neutra, la cual fue más baja que las demás épocas. El mismo mes presentó para épocas Niño caudales mínimos promedios similares a los observados para épocas Niña (Tabla 6-6). Los caudales promedios diarios por mes muestran un comportamiento bimodal con pico en los meses de mayo y noviembre y caudales más bajos entre enero a marzo y entre agosto y septiembre (Figura 6-15).

**Figura 6-15:** Caudales mínimos promedios para épocas niño, niña y neutrales.

**Tabla 6-6:** Caudales mínimos y máximos para época niño, niña y neutrales.

CAUDALES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Promedio Máximos Niño	0.08	0.06	0.07	0.16	0.53	0.11	0.55	0.25	0.20	0.60	1.15	0.76
Promedio Máximos Neutros	0.27	0.11	0.40	1.12	1.51	0.91	0.49	0.40	0.35	1.13	1.50	0.43
Promedio Máximos Niña	0.33	0.72	1.27	1.92	2.23	1.45	1.32	0.45	1.42	2.38	2.28	1.65
Promedio Mínimos Niño	0.04	0.04	0.02	0.04	0.12	0.04	0.05	0.08	0.06	0.06	0.11	0.08
Promedio Mínimos Neutro	0.05	0.04	0.02	0.06	0.13	0.15	0.09	0.09	0.05	0.05	0.08	0.07
Promedio Mínimos Niña	0.07	0.04	0.07	0.09	0.21	0.12	0.17	0.14	0.12	0.08	0.33	0.17
Promedio Diarios	0.10	0.09	0.15	0.33	0.45	0.31	0.25	0.16	0.16	0.38	0.59	0.34

Los caudales máximos promedios en años Niño mostraron picos de caudal en el mes de mayo, julio y noviembre, y caudales bajos en los meses de enero a abril, junio y septiembre. Para las épocas Niña el comportamiento fue bimodal con picos en los meses de mayo, octubre y noviembre y caudales bajos en los meses de enero y agosto. Para las épocas neutrales también se observó un comportamiento bimodal con picos en los meses de mayo y noviembre, y caudales bajos en los meses de enero a marzo y de julio a septiembre (Figura 6-16).

**Figura 6-16:** caudales máximos promedios para épocas niño, niña y neutrales.

Los periodos que mostraron más variaciones de caudal entre fueron los correspondientes a fenómeno de la niña, mientras que los periodos con periodo del Niño mostraron comportamiento más similares y estables, lo cual sugiere que la cuenca La Chorrera tiene una pobre regulación hídrica.



6.2.1 Modelación hidrológica

Para obtener una aproximación del comportamiento hidrológico que se presenta en puntos no aforados dentro de la cuenca, se implementó el modelo hidrológico SWAT (Soil and water Assessment tool), usando el DEM proveniente de la plataforma Alos Palsar. Las coberturas vegetales fueron obtenidas de una imagen Sentinel 2A, la información de suelos fue obtenida del levantamiento de suelos a escala 1:25.000 y 1:100.000 del IGAC y la información hidrometereológica de las estaciones del IDEAM listadas en la Tabla 6-7 y espacializadas en la Figura 6-17.

Figura 6-17: ubicación espacial de las estaciones usadas en la modelación hidrológica.

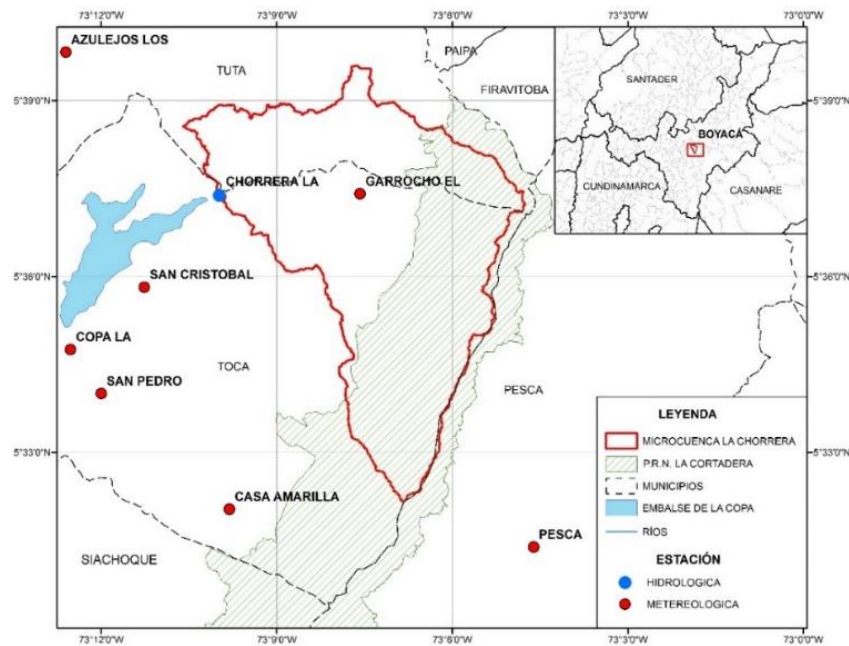


Tabla 6-7: Estaciones Hidrometereológicas usadas en la modelación hidrológica.

COORDENADAS		ESTACIÓN	CODIGO IDEAM	VARIABLES					
Longitud	Latitud			Q	PPT	H.R.	R.S.	T°	V.V
-73° 4' 36.65"	5° 31' 22.92"	PESCA	24030120		X				
-73° 12' 0.0"	5° 34' 0.0"	SAN PEDRO	24030550		X				
-73° 7' 34.7"	5° 37' 24.5"	GARROCHO EL	24030770		X				
-73° 9' 48.6"	5° 32' 1.7"	CASA AMARILLA	24030800		X				
-73° 12' 36.4"	5° 39' 49.4"	AZULEJOS LOS	24030820		X				
-73° 12' 31.6"	5° 34' 45.1"	COPA LA	24035040		X	X	X	X	X
-73° 11' 15.8"	5° 35' 48.9"	SAN CRISTOBAL	24035300		X				
-73° 9' 59.0"	5° 37' 22.9"	CHORRERA LA	24037590	X					

Q=Caudal, PPT= Precipitación, H.R.= Humedad Relativa, R.S.= Radiación Solar. T°=Temperatura, V.V.=Velocidad del viento.



Una vez implementado el modelo, se procedió a realizar la calibración usando el software SWAT CUP. Este software integra varios procedimientos de análisis de calibración e incertidumbre para SWAT usando el ajuste de incertidumbre secuencial (SUFI-2), la optimización de enjambre de partículas (PSO), la estimación de incertidumbre de probabilidad generalizada (GLUE), la solución de parámetros (ParaSol) y el algoritmo Markov Chain Monte Carlo (MCMC). Para este estudio se usó el método de SUFI-2 por ser bastante eficiente para modelos a gran escala que consumen mucho tiempo (Yang et al., 2008). Basándose en los estudios realizados por (H. Zhang et al., 2020) (Yang et al., 2008) los parámetros calibrados son observados en la Tabla 6-8:

**Tabla 6-8:** Parámetros calibrados con SWATCUP

PARAMETRO	RANGO		CALIBRACIÓN	DESCRIPCIÓN DEL PARAMETRO
	min	max		
CN2	35	98	52.69	Número de curva de escorrentía SCS
ALPHA_BF	0	1	0.67	Factor alfa de flujo base (días).
GW_DELAY	0	500	489.84	Retraso del agua subterránea (días).
GWQMN	0	5000	2989.67	Profundidad de agua en la profundidad
SOL_BD	0.9	2.5	1.38	Densidad aparente húmeda.
SOL_AWC	0	1	0.253	Capacidad de agua disponible en el suelo
WET_K	0	1	0.895	Conductividad hidráulica
PND_K	0	1	1	Conductividad hidráulica a través del fondo de estanques
CH_K2	-0.01	500	498.63	Conductividad hidráulica efectiva en aluviones del canal principal
CH_K1	0	300	300	Conductividad hidráulica efectiva en aluviones de canales tributarios.
ESCO	0	1	0.917	Factor de compensación de la evaporación del suelo
GW_REVAP	0.02	0.2	0.096	Coeficiente de "renovación" del agua subterránea.
REVAPMN	0	500	337.76	Umbral de profundidad del agua en el acuífero poco profundo para que ocurra la "renovación" (mm).
RCHRG_DP	0	1	0.144	Fracción de percolación de acuíferos profundos.
SURLAG	0.05	24	16.33	Retraso de escorrentía superficial

Para calibrar estos parámetros se realizaron 8 calibraciones de 2000 iteraciones. El ajuste del modelo se determinó usando los criterios de evaluación estadística de valor de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>).

NSE es uno de los estándares más utilizados para comparar simulaciones de modelos hidrológicos con datos observados. Los valores de NSE varían de -1 a 1 con un valor de 1 indica que los resultados simulados por el modelo y los datos observados coinciden

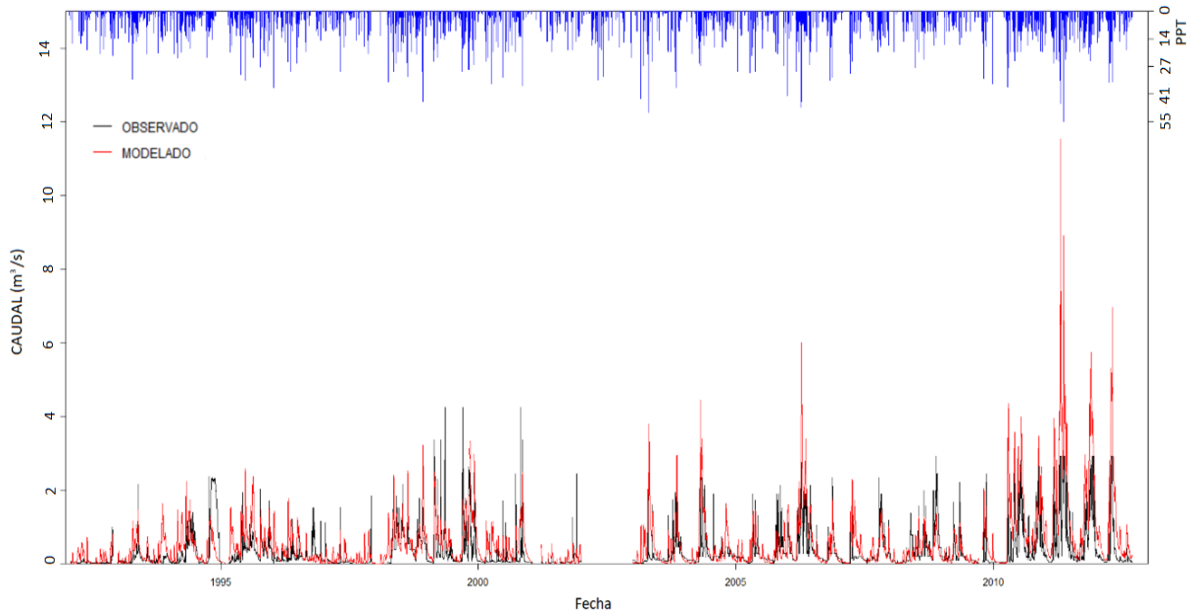
perfectamente, por lo tanto, cuanto más cerca esté el NSE de 1, mejor será el ajuste del modelo SWAT(H. Zhang et al., 2020).

PBIAS evalúa la tendencia promedio de las simulaciones del modelo para ser mayor o menor que sus contrapartes observadas. Un valor positivo de PBIAS demuestra un sesgo de sobreestimación, mientras que un valor negativo indica una subestimación (Shi et al., 2011), por lo tanto cuanto más cerca a cero sea el valor absoluto de PBIAS el modelo muestra una mejor tendencia a replicar las observaciones.

**Tabla 6-9:** Funciones objetivos de la calibración con SWATCUP.

Función Objetivo	Valor
R2	0.48
NS	0.47
PBIAS	4.1
Mean_sim(Mean_obs)	0.31(0.33)
StdDev_sim(StdDev_obs)	0.41(0.50)

**Figura 6-18:** caudales observados vs caudales modelados



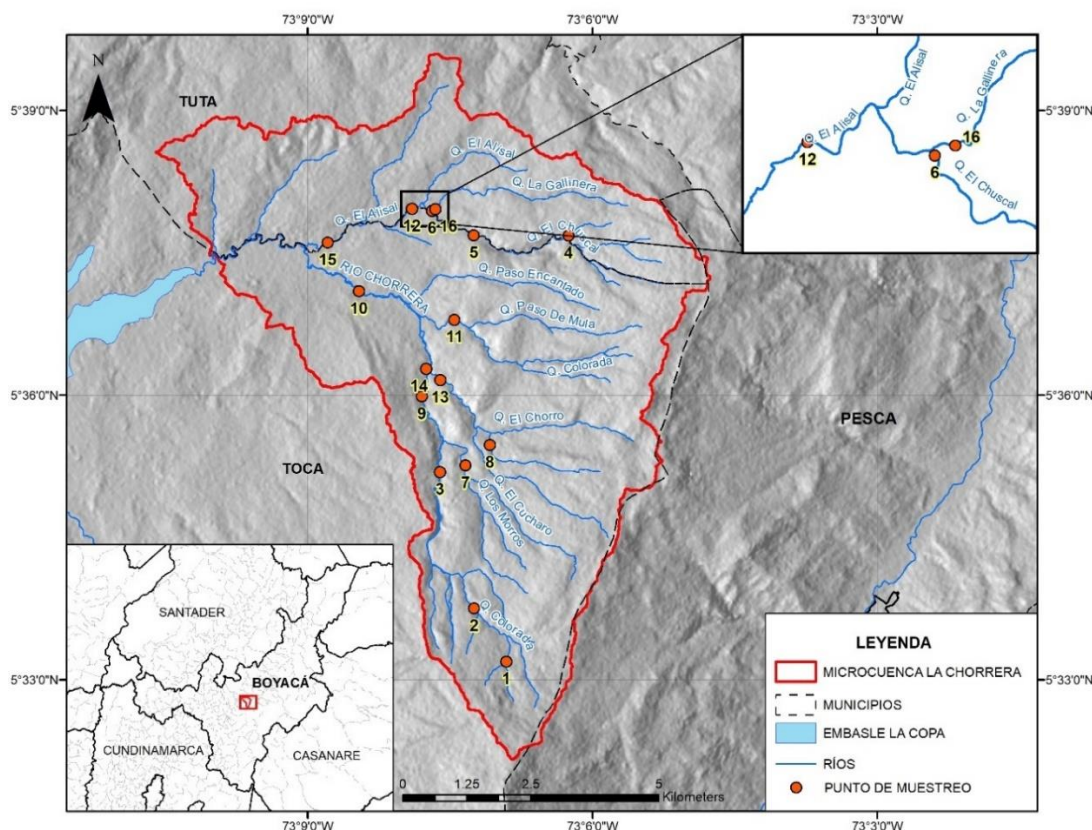
A pesar que el valor de NSE fue de 0.48, se podría considerar que la modelación fue satisfactoria, ya que este valor estuvo muy cerca de 0.5, que según (Shi et al., 2011) es el umbral de una modelación satisfactoria (ANEXO C). Además el valor de PBIAS fue de 4.1 (Tabla 6-9), lo cual indica que la tendencia promedio de los datos modelados respecto los observados fue muy buena (Shi et al., 2011). Este buen ajuste se puede observar con la gráfica los caudales simulados VS observados que se ilustra en la

Figura 6-18. La media y desviación estándar de los valores simulados son muy similares a los observados y los valores bajos se ajustan bastante bien, que para el caso de este estudio son los de mayor interés.

### 6.3 Funcionalidad Ecológica

Con el fin de llevar a cabo el muestreo de macroinvertebrados y de calidad de agua, se seleccionaron dentro de la red hídrica de la cuenca 16 transectos que fueran representativos de cambios en características morfológicas, topográficas, de cobertura de los ríos y quebradas presentes en la cuenca. La ubicación de esto transectos se ilustra en la Figura 6-19.

**Figura 6-19:** ubicación de los transectos de muestreo.



Una vez realizado el muestreo de macroinvertebrados y de calidad de agua en cada uno de los 16 tramos se encontraron y clasificaron 16269 individuos. Se logró identificar 1 Phylum, 1 clase, 3 subclases, 9 Ordenes, 23 Familias y 2 morfoespecies. El 70.51 % de los individuos se lograron clasificar hasta familia, el 23.03% hasta subclase y el 3.06% hasta Orden. Chironomidae fue la familia más abundante con el 42%, seguido por Simuliidae con el 16.7% y Ceratopogonidae con 3.51%, sumando el 62.26% de los individuos observados. Las demás familias estuvieron por debajo del 3%. Oligochaeta fue el orden más abundante con el 22.08% y los demás ordenes estuvieron por debajo del 1%.

Entre estas tres familias y este orden se agrupa el 84.34% de los individuos clasificados. En el punto 13 se encontró el mayor número de individuos, en este punto en época seca se contaron 1604 individuos, de los cuales 864 fueron de la subclase Oligochaeta y 456 a la familia Chironomidae, representando el 8.11% del total de individuos. En el punto 15, en época húmeda se identificaron 1089 individuos, siendo el segundo lugar con mayor abundancia. De estos, 504 fueron de la familia Chironomidae y 408 a la subclase Oligochaeta sumando entre los dos grupos el 5.6% del total de individuos.

Al realizar la prueba de normalidad de Shapiro Wilk a las variables hidráulicas y a los índices de diversidad y dominancia, se pudo observar que el Índices de Shannon, velocidad y Profundidad, mostraron un comportamiento normal, mientras que los datos de Riqueza, índice Simpson y caudal mostraron un comportamiento no normal ( $P\text{-value} < 0.05$ ) (Tabla 6-10).

**Tabla 6-10:** prueba de normalidad Shapiro Wilk en variables hidráulicas e índices de diversidad y riqueza

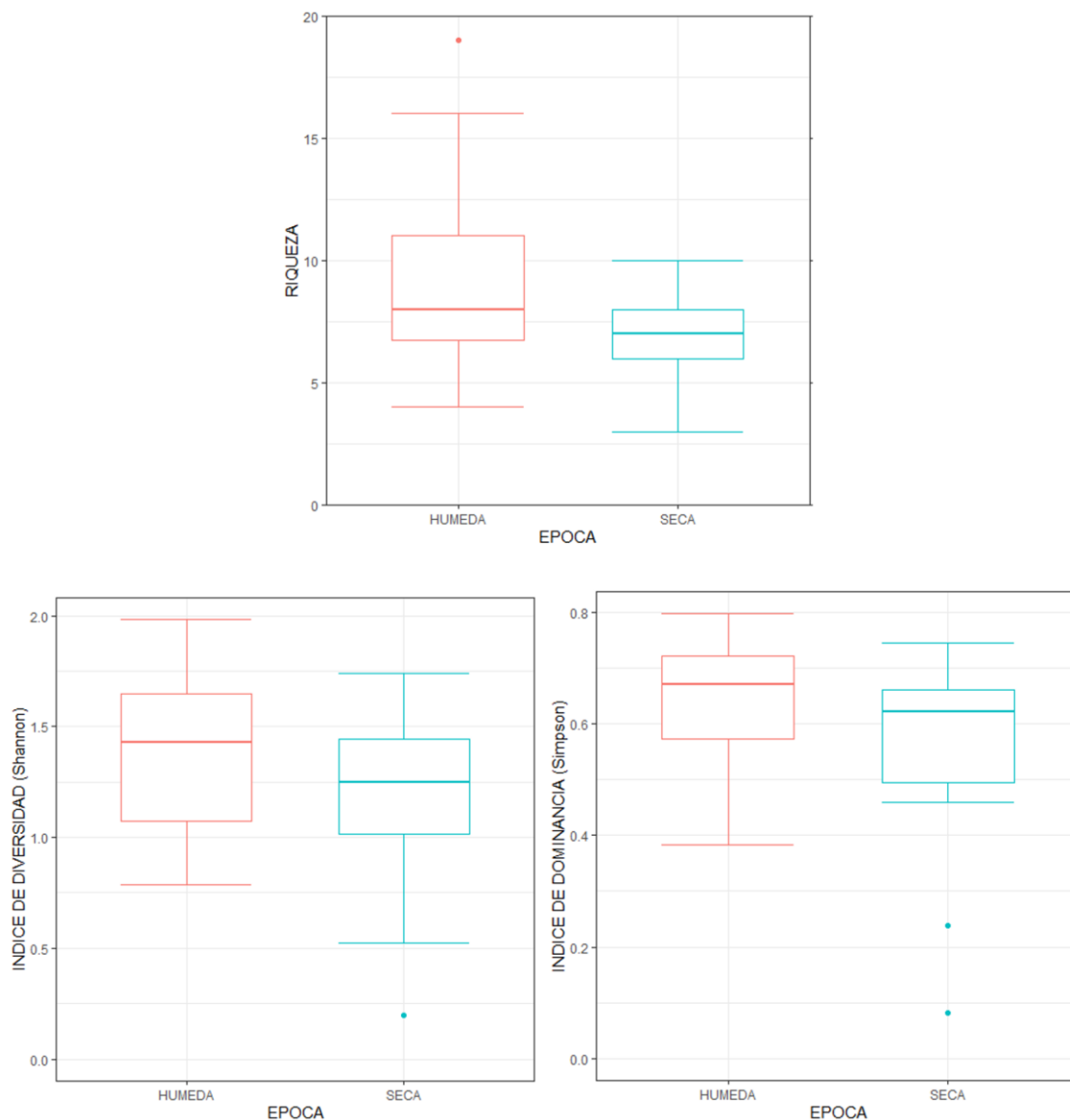
variable	W	P-value	Norm
Riqueza	0.873966	0.001435	
Shannon	0.973185	0.591545	*
Simpson	0.887104	0.002955	
Velocidad	0.942734	0.089531	*
Caudal	0.854475	0.000519	
Profundidad	0.958069	0.243024	*

Las pruebas estadísticas de diferencias significativas observadas en la Tabla 6-11, muestran que existen diferencias significativas entre épocas de muestreo en Velocidad, Caudal y Profundidad ( $P\text{-value} < 0.05$ ). No se presentaron diferencias significativas en los índices de Shannon, índice de Simpson ni en la riqueza ( $P\text{-value} > 0.05$ ) (Figura 6-20). En la época seca se presentaron en promedio 7 individuos más que en época húmeda, pero en época húmeda se presentaron en promedio 2 taxas más que en época seca lo cual indica que en época húmeda se presenta más riqueza de macroinvertebrados.

**Tabla 6-11:** pruebas estadísticas de diferencias significativas entre época húmeda y seca para variables hidráulicas e índices de diversidad y riqueza

Variable	Prueba	P-value	dif
RIQUEZA	kruskal	0.127263	
SHANNON	t-student	0.168727	
SIMPSON	kruskal	0.16317	
velocidad	t-student	0.001177	*
caudal	kruskal	0.000838	*
Profundidad	t-student	0.00077	*

**Figura 6-20:** Graficas de caja y bigote para riqueza, Índice de diversidad (Shannon) e Índice de dominancia (Simpson) en época seca y húmeda.



Las variables hidráulicas de Velocidad, Profundidad y caudal mostraron diferencias significativas entre épocas, mostrando un aumento de las tres variables en época húmeda Figura 6-21. Para época húmeda el promedio de velocidad fue de 0.45 m/s y para época seca fue de 0.23 m/s. La profundidad promedio entre puntos muestreados para época húmeda fue de 28.92 cm y para época seca fue de 18.56 cm, el caudal promedio en época seca fue de 0.25 m<sup>3</sup>/s y de 0.34 m<sup>3</sup>/s para época húmeda.

Con respecto a las características químicas del agua, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Solidos Suspendidos Totales (SST), pH, Temperatura, Fosforo Total (P) y Oxígeno Disuelto (O.D.) mostraron comportamiento normal, mientras que Demanda Química de

Oxígeno (DQO). Nitrógeno (NT), Coliformes Totales, *Escherichia Coli* (E. Coli) y Conductividad Eléctrica (C.E.) mostraron comportamiento no normal.

Las pruebas de diferencias significativas mostraron que las variables DBO, SST, pH, P, O.D. y Temperatura no mostraron diferencias significativas entre épocas de muestreo (Tabla 6-12). A pesar de esto, la DQO y temperatura mostraron en promedio un ligero aumento en época seca y el O.D. y SST disminuyeron en época seca, como se ilustra en la Tabla 6-13. La correlación entre las variables físico-químicas y bióticas en los puntos muestreados mostraron en términos generales correlaciones bajas, pero cabe destacar que el Nitrógeno Total mostró una correlación inversa de -0.6 con la temperatura y una correlación directa de 0.6 con el Índice de calidad de agua y de 0.53 con la riqueza. El oxígeno disuelto mostró una correlación directa de 0.54 con la Velocidad, de 0.51 con el Caudal y de 0.51 con la Profundidad. El índice de Calidad de Agua presentó correlación inversa de -0.53 con Temperatura, Fosforo Total tiene correlación inversa de -0.49 con profundidad y de -0.48 con Oxígeno disuelto

### 6.3.1 Curvas de Idoneidad de Hábitat

Las taxas a las cuales se realizó la curva de idoneidad de hábitat estuvieron presentes en más del 80% de las muestras colectadas, en más de 10 puntos muestreados en época húmeda y en más de 4 puntos muestreados en época seca. La subclase *Oligochaeta* estuvo presente en 12 puntos en época húmeda y en 14 puntos en época seca, con un total de 3592 individuos correspondiente al 22.07% del total de individuos, cuya presencia presentó correlación directa de 0.29 con Velocidad, 0.37 con Caudal, 0.51 con Profundidad y de 0.14 con índice de Sustrato como se ilustra en la Figura 6 23. Además, presentó una correlación de -0.14 con Nitrógeno total y de 0.11 para Temperatura.

La familia *Ceratopogonidae* estuvo presente en 9 puntos en época húmeda y en 8 puntos en época seca, con un total de 572 individuos correspondiente al 3.51% del total de individuos, mostrando correlación directa de 0.33 con Velocidad, 0.56 con Caudal, 0.67 con Profundidad y 0.14 con el índice de Sustrato como se ilustra en la Figura 6 24. Además, se observó una correlación de 0.11 con C.E., -0.28 con Nitrógeno total y de 0.14 con temperatura.

Las variables DQO, N, Coliformes Totales, E. Coli y C.E mostraron diferencias significativas (Tabla 6-12) y en promedio las variables DQO, C.E, Coliformes totales y E. Coli aumentaron los valores en época seca. En época húmeda los valores de N aumentaron (Tabla 6-13). La correlación entre las variables físico-químicas y bióticas en los puntos muestreados mostraron en términos generales correlaciones bajas como se ilustra en la

Las taxas a las cuales se realizó la curva de idoneidad de hábitat estuvieron presentes en más del 80% de las muestras colectadas, en más de 10 puntos muestreados en época húmeda y en más de 4 puntos muestreados en época seca. La subclase *Oligochaeta* estuvo presente en 12 puntos en época húmeda y en 14 puntos en época seca, con un

total de 3592 individuos correspondiente al 22.07% del total de individuos, cuya presencia presentó correlación directa de 0.29 con Velocidad, 0.37 con Caudal, 0.51 con Profundidad y de 0.14 con índice de Sustrato como se ilustra en la Figura 6-23. Además, presento una correlación de -0.14 con Nitrógeno total y de 0.11 para Temperatura, cuyos valores son similar a los observado por (Motta, 2018), quien observo correlación de 0.16 para nitratos y de 0.36 para temperatura

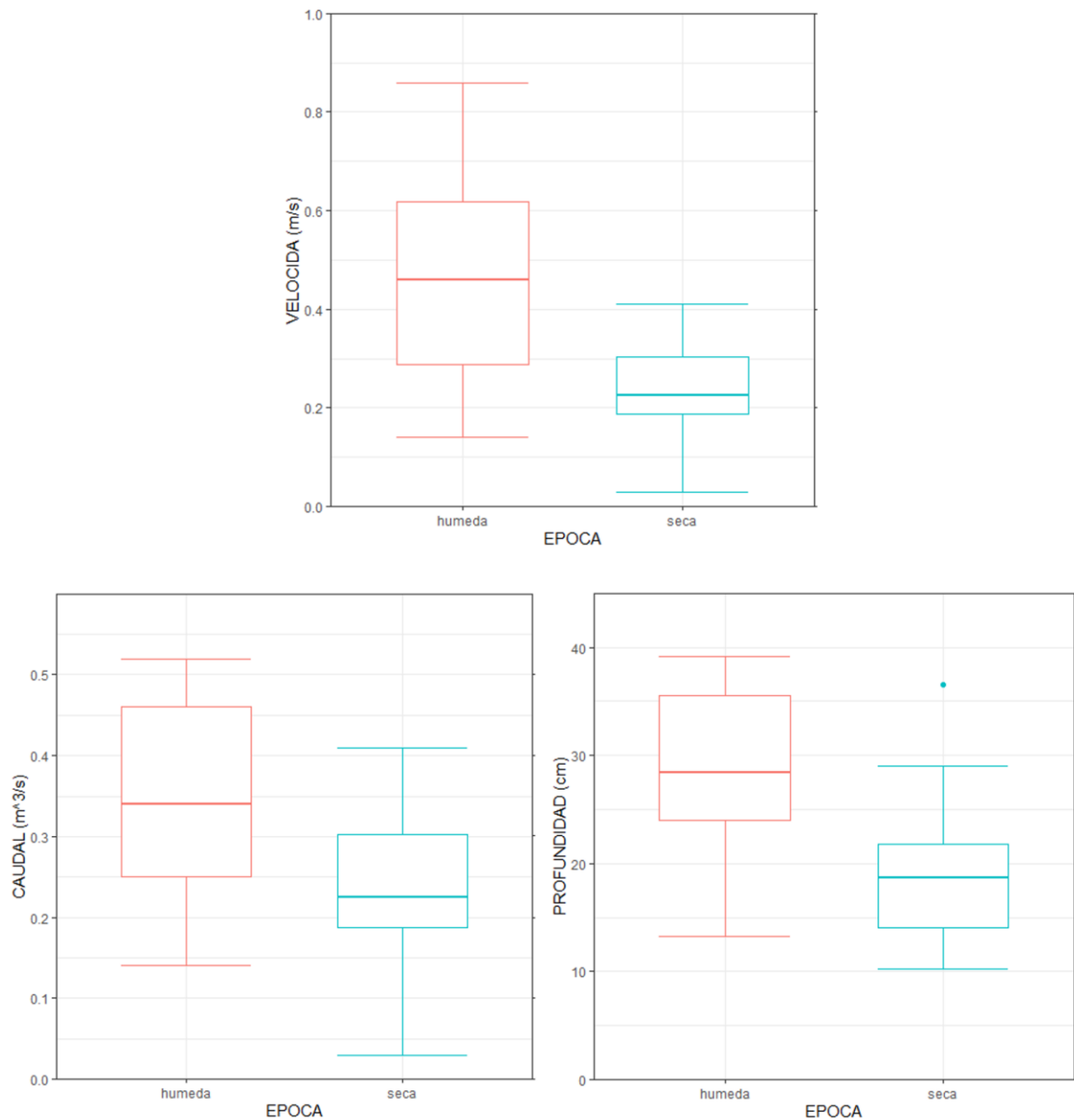
La familia Ceratopogonidae estuvo presente en 9 puntos en época húmeda y en 8 puntos en época seca, con un total de 572 individuos correspondiente al 3.51% del total de individuos, mostrando correlación directa de 0.33 con Velocidad, 0.56 con Caudal, 0.67 con Profundidad y 0.14 con el índice de Sustrato como se ilustra en la Figura 6-24. Además, se observó una correlación de 0.11 con C.E., -0.28 con Nitrógeno total y de 0.14 con temperatura , estos valores son similares a los observados por (Motta, 2018) quien obtuvo una correlación de 0.11 para C.E., -0.04 con Nitratos y 0.29 con temperatura.

Figura 6-22, pero cabe destacar que el nitrógeno Total mostró una correlación inversa de -0.6 con la temperatura y una correlación directa de 0.6 con el Índice de calidad de agua y de 0.53 con la riqueza. El oxígeno disuelto mostró una correlación directa de 0.54 con la Velocidad, de 0.51 con el Caudal y de 0.51 con la Profundidad, el índice de Calidad de Agua presentó correlación inversa de -0.53 con Temperatura. Fosforo total tiene correlación inversa de -0.49 con profundidad y de -0.48 con Oxígeno disuelto.

**Tabla 6-12:** Prueba de normalidad Shapiro Wilk para variables Físico-químicas y microbiológicas.

	statistic	p.value	Norm
DBO	0.968244	0.452398	*
SST	0.942236	0.086655	*
pH	0.982593	0.870457	*
Temp.	0.94194	0.084995	*
DQO	0.906228	0.008955	
N	0.885156	0.00265	
P	0.58043	2.15E-08	
Coliformes T.	0.431865	5.07E-10	
E. Coli	0.391175	2.04E-10	
O.D.	0.866726	0.000977	
C.E.	0.787179	2.36E-05	

**Figura 6-21:** Graficas de caja y bigote para Velocidad, Caudal y profundidad en época seca y húmeda.



Las taxas a las cuales se realizó la curva de idoneidad de hábitat estuvieron presentes en más del 80% de las muestras colectadas, en más de 10 puntos muestreados en época húmeda y en más de 4 puntos muestreados en época seca. La subclase Oligochaeta estuvo presente en 12 puntos en época húmeda y en 14 puntos en época seca, con un total de 3592 individuos correspondiente al 22.07% del total de individuos, cuya presencia presentó correlación directa de 0.29 con Velocidad, 0.37 con Caudal, 0.51 con Profundidad y de 0.14 con índice de Sustrato como se ilustra en la Figura 6 23. Además, presento una correlación de -0.14 con Nitrógeno total y de 0.11 para Temperatura, cuyos valores son



similar a los observado por (Motta, 2018), quien observo correlación de 0.16 para nitratos y de 0.36 para temperatura

La familia Ceratopogonidae estuvo presente en 9 puntos en época húmeda y en 8 puntos en época seca, con un total de 572 individuos correspondiente al 3.51% del total de individuos, mostrando correlación directa de 0.33 con Velocidad, 0.56 con Caudal, 0.67 con Profundidad y 0.14 con el índice de Sustrato como se ilustra en la Figura 6 24. Además, se observó una correlación de 0.11 con C.E., -0.28 con Nitrógeno total y de 0.14 con temperatura , estos valores son similares a los observados por (Motta, 2018) quien obtuvo una correlación de 0.11 para C.E., -0.04 con Nitratos y 0.29 con temperatura (Figura 6-22), la correlación entre las variables físico-químicas y bióticas en lo puntos muestreados mostraron en términos generales correlaciones bajas como se ilustra en la Curvas de Idoneidad de Hábitat

Las taxas a las cuales se realizó la curva de idoneidad de hábitat estuvieron presentes en más del 80% de las muestreas colectadas, en más de 10 puntos muestreados en época húmeda y en más de 4 puntos muestreados en época seca. La subclase Oligochaeta estuvo presente en 12 puntos en época húmeda y en 14 puntos en época seca, con un total de 3592 individuos correspondiente al 22.07% del total de individuos, cuya presencia presentó correlación directa de 0.29 con Velocidad, 0.37 con Caudal, 0.51 con Profundidad y de 0.14 con índice de Sustrato como se ilustra en la Figura 6 23. Además, presento una correlación de -0.14 con Nitrógeno total y de 0.11 para Temperatura, cuyos valores son similar a los observado por (Motta, 2018), quien observo correlación de 0.16 para nitratos y de 0.36 para temperatura

La familia Ceratopogonidae estuvo presente en 9 puntos en época húmeda y en 8 puntos en época seca, con un total de 572 individuos correspondiente al 3.51% del total de individuos, mostrando correlación directa de 0.33 con Velocidad, 0.56 con Caudal, 0.67 con Profundidad y 0.14 con el índice de Sustrato como se ilustra en la Figura 6 24. Además, se observó una correlación de 0.11 con C.E., -0.28 con Nitrógeno total y de 0.14 con temperatura , estos valores son similares a los observados por (Motta, 2018) quien obtuvo una correlación de 0.11 para C.E., -0.04 con Nitratos y 0.29 con temperatura (Figura 6 22).

Cabe destacar que el nitrógeno Total mostró una correlación inversa de -0.6 con la temperatura, una correlación directa de 0.6 con el Índice de calidad de agua y de 0.53 con la riqueza. El oxígeno disuelto mostró una correlación directa de 0.54 con la Velocidad, de 0.51 con el Caudal y de 0.51 con la Profundidad. El índice de Calidad de Agua presentó correlación inversa de -0.53 con Temperatura. Fosforo total tiene correlación inversa de -0.49 con profundidad y de -0.48 con Oxígeno disuelto.

**Tabla 6-13:** Valores promedios de las variables físico-químicas en los sitios muestreados en la Chorrera.

VARIABLE	EPOCA HUMEDA	EPOCA SECA	PROMEDIO EPOCA HUMEDA Y SECA
DBO mg/L O <sub>2</sub>	4.48	4.56	4.52
DQO mg/L O <sub>2</sub>	13.22	14.03	13.62
Solidos suspendidos Totales mg/L	10.37	9.00	9.69
Nitrógeno Total mg/L N	5.92	4.53	5.23
Fosforo Total mg/L P	0.01	0.13	0.07
OD mg/L	7.19	4.53	5.86
OD %	0.67	0.43	0.55
pH	6.45	6.61	6.53
Conductividad Electrica $\mu$ S/m	13.18	21.88	17.53
Temperatura °C	11.93	12.72	12.32
Coliformes Totales NMP/100ml	250.39	1896.07	1073.23
E. Coli NMP/100ml	80.59	930.85	505.72
Riqueza	9.06	6.94	8.00
Shannon	1.37	1.18	1.27
Simpson	0.64	0.56	0.60
Índice de sustrato	5.07	4.94	5.01
Velocidad m	0.45	0.23	0.34
Caudal m <sup>3</sup> /s	0.25	0.10	0.18
Profundidad cm	28.92	19.52	24.22

Las taxas a las cuales se realizó la curva de idoneidad de hábitat estuvieron presentes en más del 80% de las muestras colectadas, en más de 10 puntos muestreados en época húmeda y en más de 4 puntos muestreados en época seca. La subclase Oligochaeta estuvo presente en 12 puntos en época húmeda y en 14 puntos en época seca, con un total de 3592 individuos correspondiente al 22.07% del total de individuos, cuya presencia presentó correlación directa de 0.29 con Velocidad, 0.37 con Caudal, 0.51 con Profundidad y de 0.14 con índice de Sustrato como se ilustra en la Figura 6-23. Además, presento una correlación de -0.14 con Nitrógeno total y de 0.11 para Temperatura, cuyos valores son similar a los observado por (Motta, 2018), quien observo correlación de 0.16 para nitratos y de 0.36 para temperatura

La familia Ceratopogonidae estuvo presente en 9 puntos en época húmeda y en 8 puntos en época seca, con un total de 572 individuos correspondiente al 3.51% del total de individuos, mostrando correlación directa de 0.33 con Velocidad, 0.56 con Caudal, 0.67 con Profundidad y 0.14 con el índice de Sustrato como se ilustra en la Figura 6-24. Además, se observó una correlación de 0.11 con C.E., -0.28 con Nitrógeno total y de 0.14 con temperatura , estos valores son similares a los observados por (Motta, 2018) quien obtuvo una correlación de 0.11 para C.E., -0.04 con Nitratos y 0.29 con temperatura.

Figura 6-22: Correlación entre variables físico-químicas y bióticas.

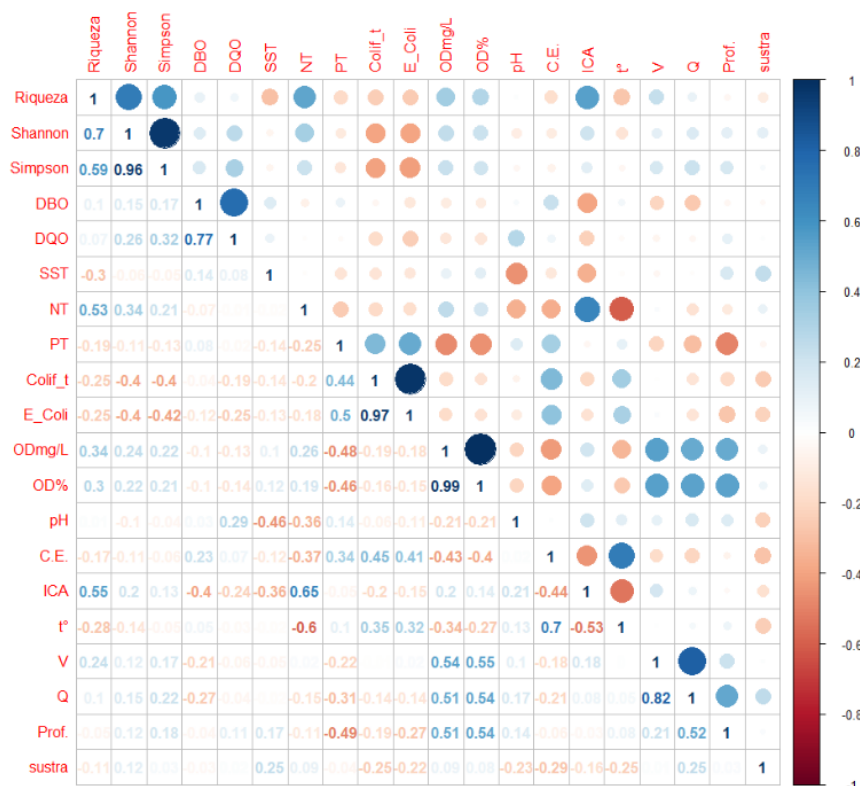
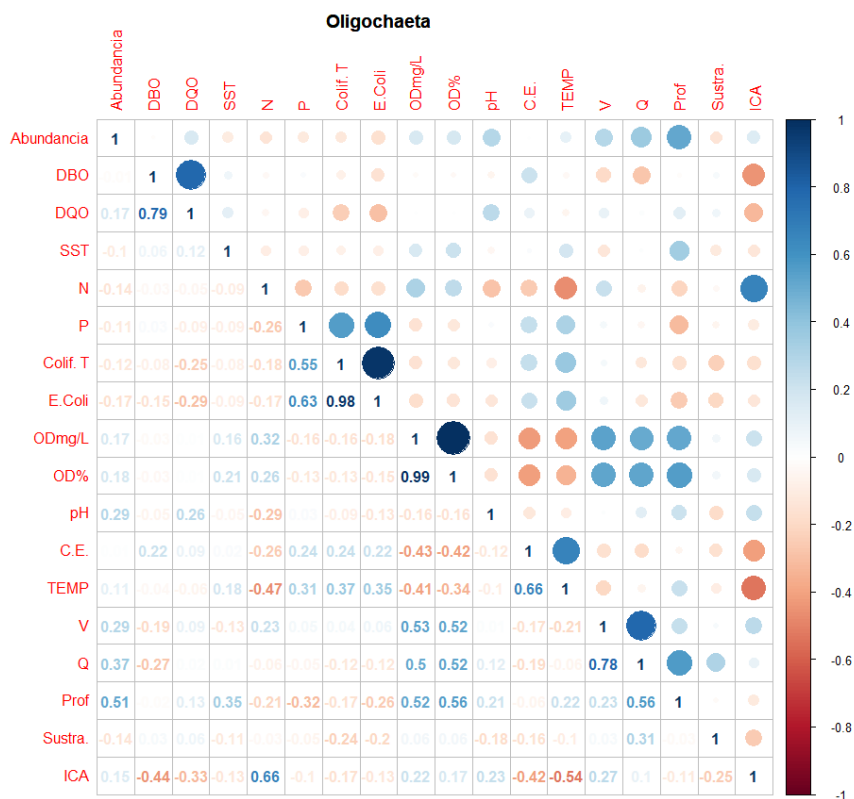
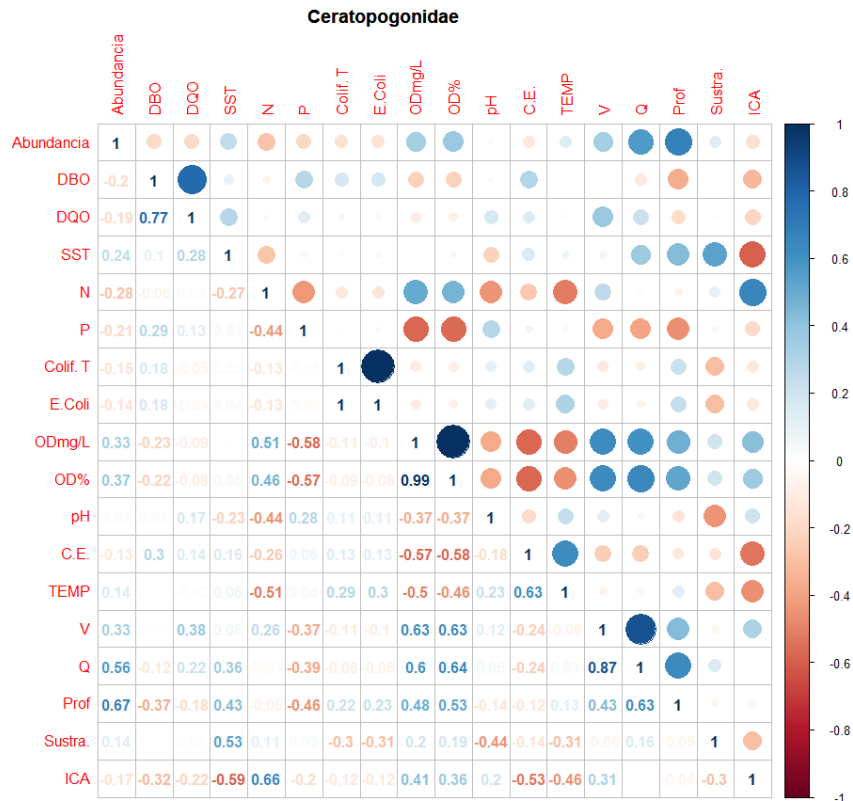


Figura 6-23: Correlación entre la subclase Oligochaeta y las variables Físico-químicas del agua.



**Figura 6-24:** Correlación entre la familia Ceratopogonidae y las variables Físico-químicas del agua.



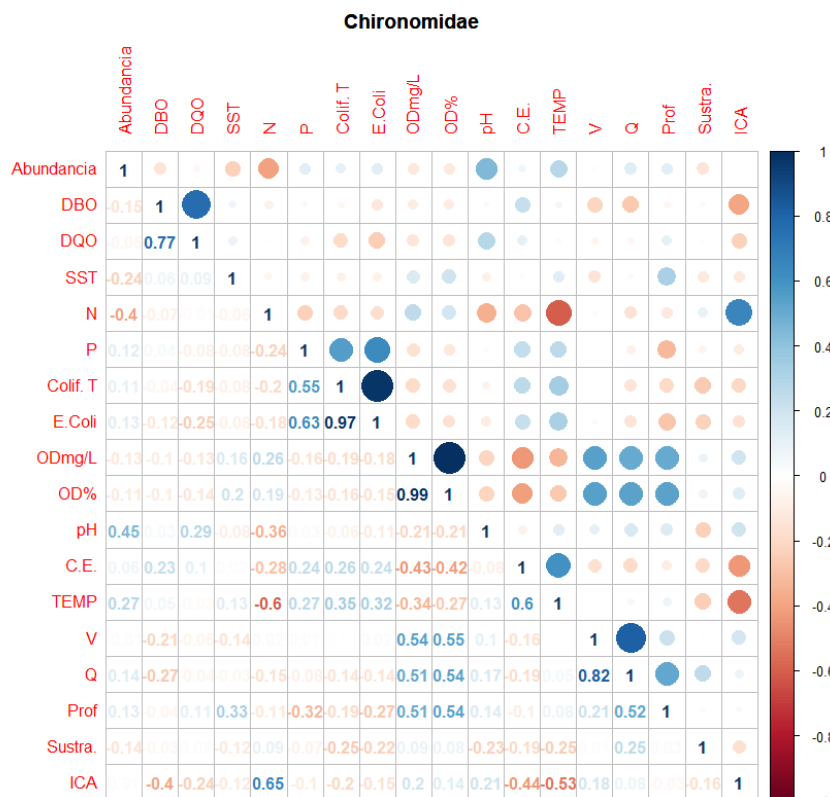
La familia Chironomidae estuvo presente en todos los puntos muestreados de las dos épocas con 6833 individuos que representan el 42% de los individuos observados, siendo el grupo más abundante, pero sus correlaciones con variables hidráulicas fueron muy bajas entre -0.14 y 0.14 como se ilustra en la Figura 6-25. Esta familia parece ser una de las que más presencia tiene, ya que en el estudio realizado por (Motta, 2018) fue la de mayor riqueza.

El orden Oribatida estuvo presente en 10 puntos en época húmeda y en 4 puntos en época seca con un total de 119 individuos correspondiente al 0.73% del total de individuos. Su presencia mostró una correlación directa de 0.64 con Profundidad y de 0.28 con el índice de Sustrato. La correlación con Velocidad y caudal fue muy baja con 0.09 y 0.1 correspondientemente como se ilustra en la Figura 6-26.

La subclase Acari estuvo presente en 8 puntos en época seca y en 7 puntos en época húmeda con un total de 151 individuos que corresponde al 0.93% de total de individuos. Su abundancia presentó una correlación inversa de -0.51 con Velocidad, -0.43 con el índice de calidad de agua y de -0.27 con Caudal como se ilustra en la Figura 6-27. La familia

simuliidae estuvo presente en 13 sitios para época seca y en 13 sitios en época húmeda con un total de 2724 individuos, pero no presentó correlaciones importantes con las variables físico-químicas del agua por lo cual no se elaboró ninguna curva de idoneidad. Tanto la subclase Acarí y la familia Simuliidae también mostraron baja presencia en el estudio realizado por (Motta, 2018).

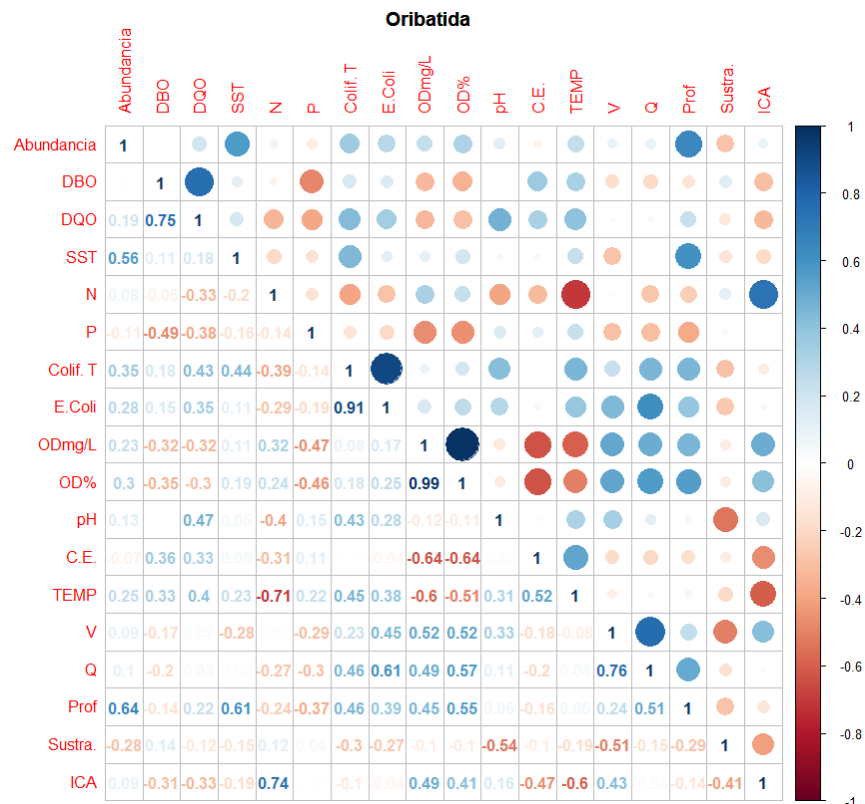
**Figura 6-25:** Correlación entre la familia Chironomide y las variables Físico-químicas del agua.



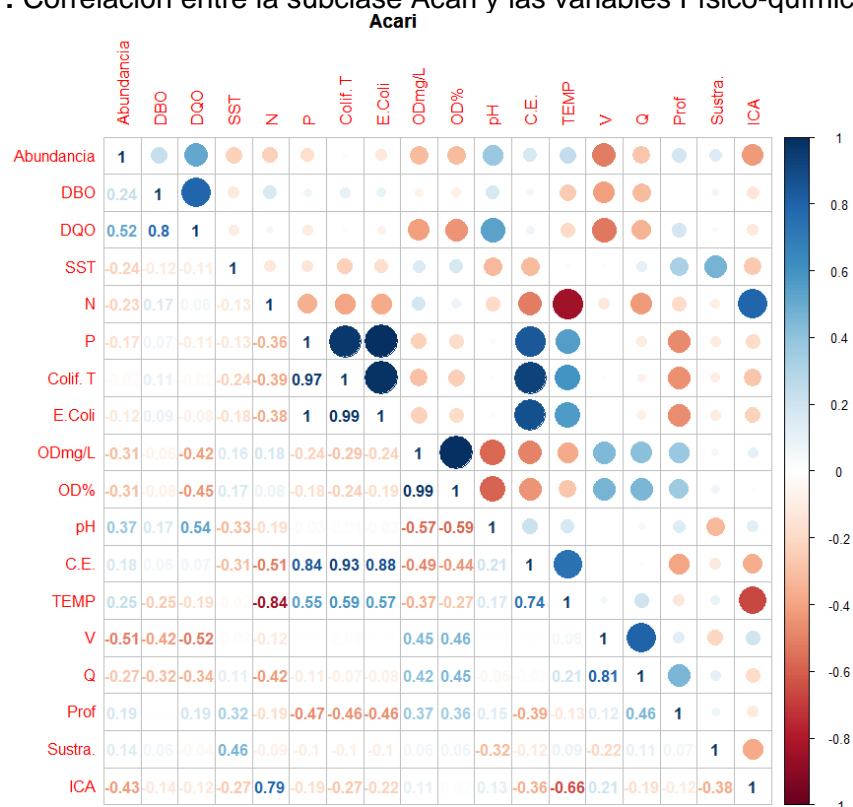
La subclase Oligochaeta mostró preferencia (Índice de Idoneidad= 1) a profundidades mayores de 40 cm y Velocidades mayores de 0.9 m/s, para caudales se observó una preferencia a valores cercanos a 0.3 m<sup>3</sup>/s como se ilustra en la Figura 6-28.

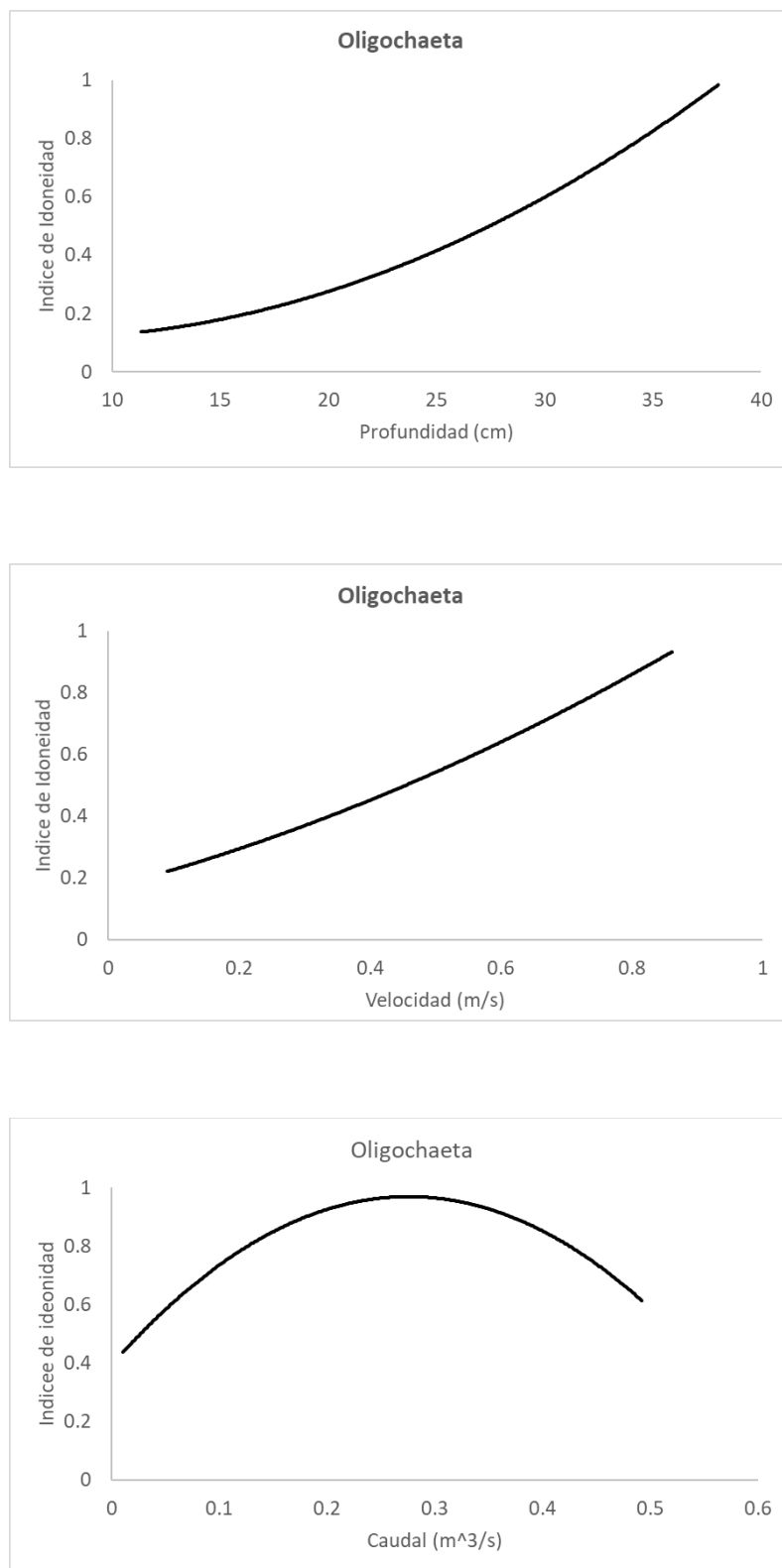
La familia Ceratopogonidae tuvo preferencia por profundidades superiores a 40 cm y menor preferencia a velocidades cercanas a 20 cm, esta familia prestó una preferencia por velocidades cercanas a 0.6 m/s y esta disminuyó cuando la velocidad se acercó a cero. Además, mostró preferencia por caudales altos superiores a los 0.5 m<sup>3</sup>/s.

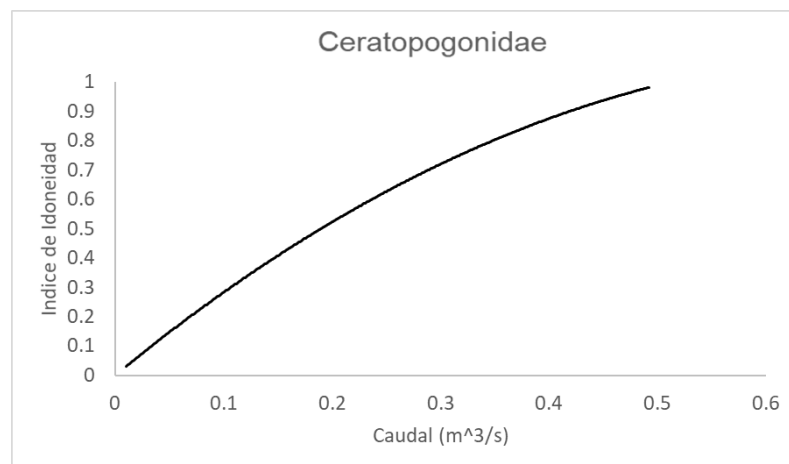
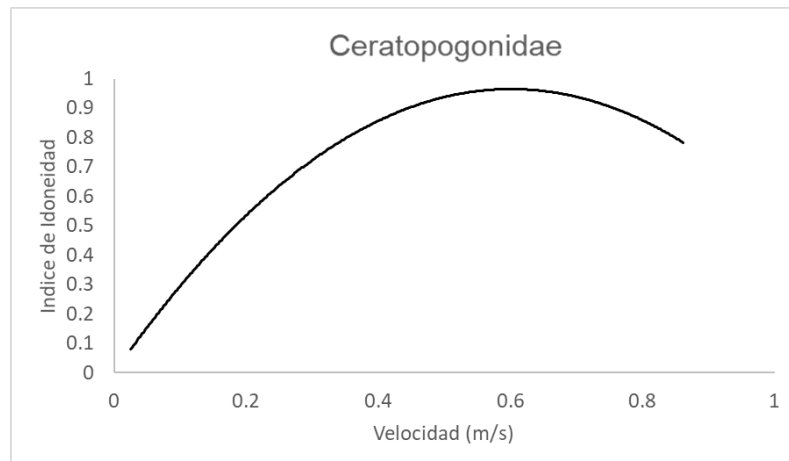
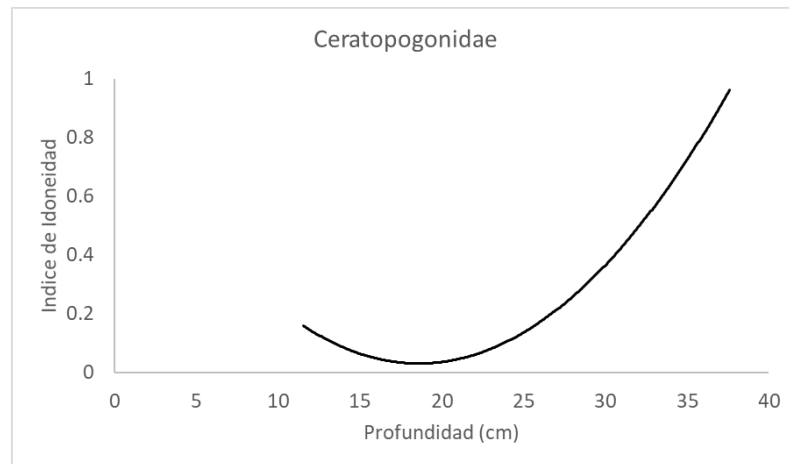
**Figura 6-26:** Correlación entre el orden Oribatida y las variables Físico-químicas del agua.



**Figura 6-27:** Correlación entre la subclase Acari y las variables Físico-químicas del agua.



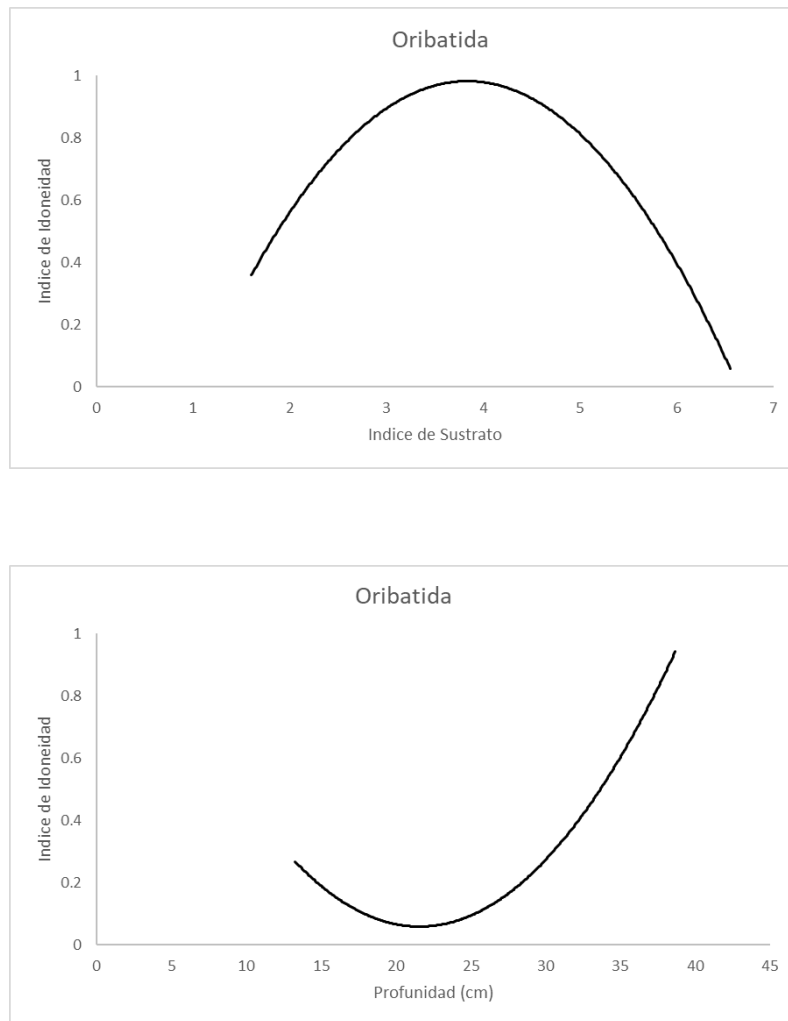
**Figura 6-28:** Curvas de idoneidad de hábitat para la Subclase Oligochaeta.

**Figura 6-29:** Curvas de idoneidad de hábitat para la familia Ceratopogonidae.

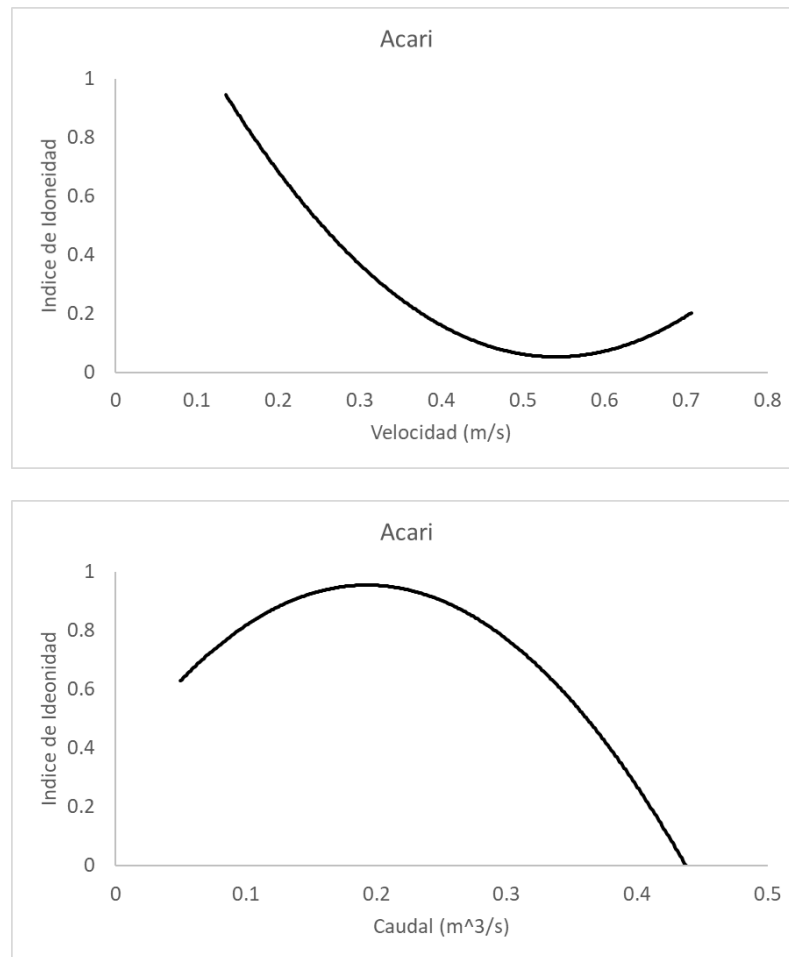
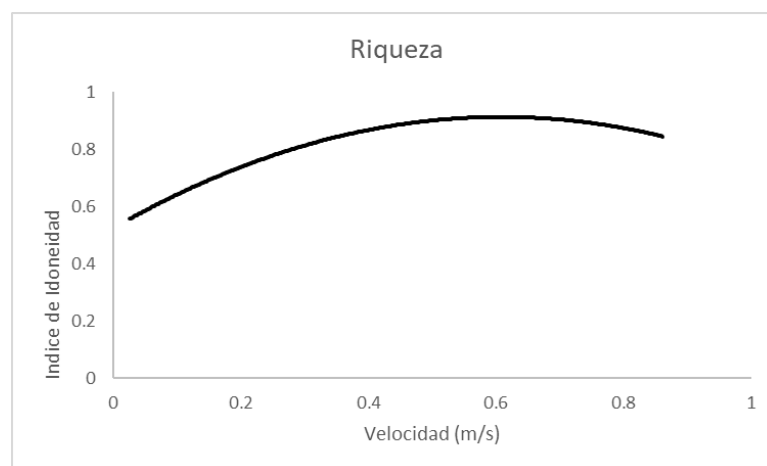


El orden Oriobatida presentó preferencias por Profundidades altas superiores a 40 cm y menor preferencia por profundidades cercanas a 21 cm, además mostró preferencia por índices de Sustrato cercanos a 4 como se ilustra en la Figura 6-30.

**Figura 6-30:** Curvas de idoneidad de hábitat para el orden Oriobatida.



La subclase Acarí presentó baja preferencia por velocidades cercanas a 0.55 m/s y esta aumentó a medida que se acercó a velocidades más bajas, y mostró preferencia por caudales cercanos a 0.2 m<sup>3</sup>/s, disminuyendo la preferencia a medida que el los caudales se acercaron a 0.4 m<sup>3</sup>/s como lo ilustra la Figura 6-31.

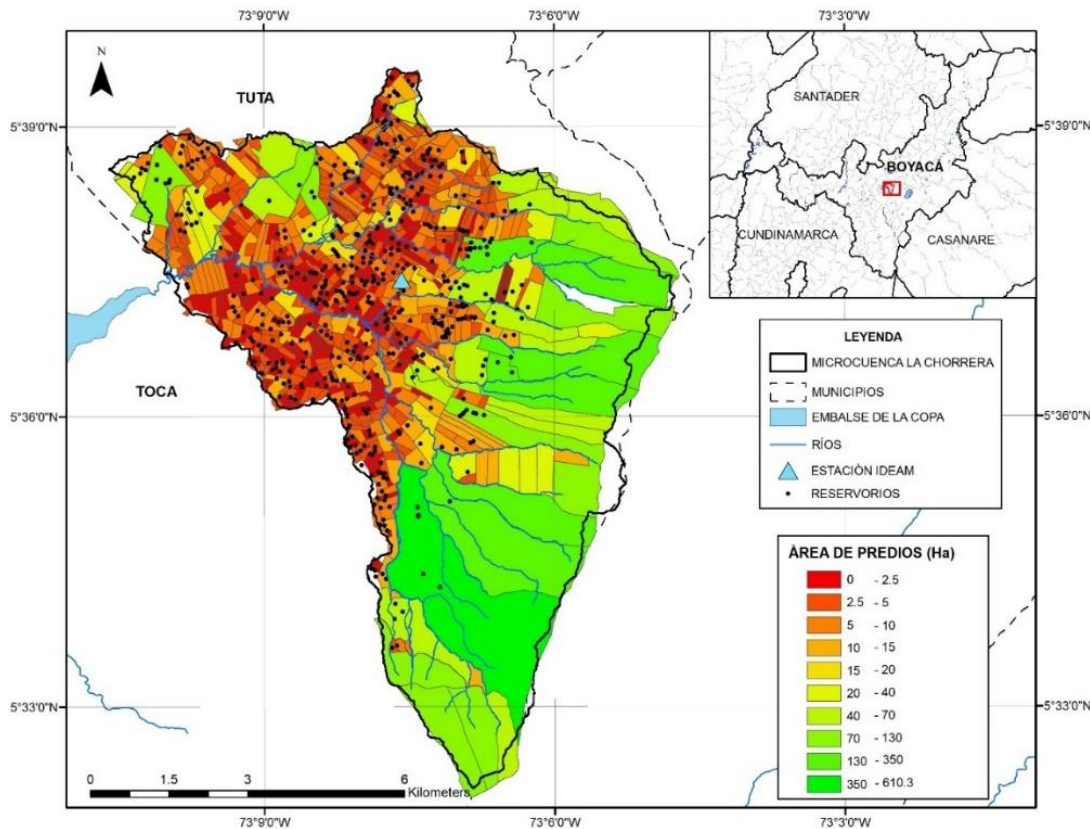
**Figura 6-31:** Curvas de idoneidad de hábitat para la subclase Acarí.**Figura 6-32:** Curvas de idoneidad de hábitat para Riqueza en todo el muestreo.

Finalmente, la riqueza encontrada en todo el muestreo para las dos épocas de muestreo solo mostró una correlación importante con la variable de Velocidad, con preferencias cercanas a los  $0.64 \text{ m}^3/\text{s}$

## 6.4 Servicios Ambientales Hídricos.

En la microcuenca La Chorrera, la precipitación promedio anual registrada por la estación GARROCHO\_EL con código IDEAM 24030770 fue de  $657.58 \text{ mm/año}$ , con un promedio de 102 días de lluvia/año. Por tal motivo en la mayoría del año suele presentarse un déficit de oferta hídrica, esto sumado a la alta fragmentación predial (minifundios) presente en la zona baja y media de la cuenca lleva a que las habitantes construyan reservorios para hacer frente a las épocas secas. Esto se puede evidenciar en los casi 560 reservorios presentes en la parte media y baja de cuenca como se ilustra en la Figura 6-33.

**Figura 6-33:** Reservorios y fragmentación predial presente en la cuenca la Chorrera.

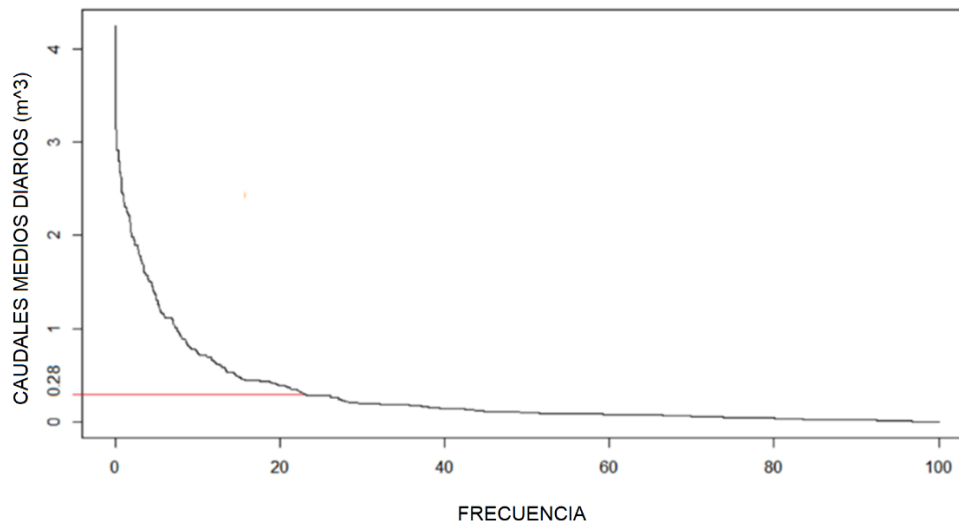


Según la información de la estación limnimétrica La Chorrera con Código IDEAM 24037590, el promedio del caudal medio diario multianual es  $0.2836 \text{ m}^3/\text{segundo}$  y la media multianual es de  $103.53 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un rendimiento hídrico  $4.24 \text{ l/s-Km}^2$ . Esto indica que la microcuenca la chorrera tiene un bajo rendimiento hídrico, siendo inferior al rendimiento promedio mundial ( $10 \text{ l/s-Km}^2$ ) y al rendimiento de Latinoamérica ( $21 \text{ l/s-Km}^2$ ), y muy por debajo de rendimiento promedio nacional ( $56 \text{ l/s-Km}^2$ ). Además, según la curva de

duración de caudales que se ilustra en la Figura 6-34, el 76.76% del tiempo se supera el caudal promedio diario multianual. La microcuenca tiene un Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) de 0.48 lo que significa que su regulación hídrica es muy baja. Esto puede estar asociado al hecho que en la parte alta de cuenca se presentan ecosistema de páramo con materiales parentales duros y suelos superficiales, al punto que en algunas zonas la roca está expuesta. Lo cual hace que haya poca infiltración y rápida escorrentía superficial, evitando que la parte alta de la cuenca retenga mucha agua.

Para época Niña el promedio del caudal medio diario es 0.2836 m<sup>3</sup>/segundo con un rendimiento hídrico de 6.61 l/s-Km<sup>2</sup>, en época Niño el promedio del caudal medio diario es 0.18 m<sup>3</sup>/segundo con un rendimiento hídrico de 2.70 l/s-Km<sup>2</sup> y para año normal el promedio del caudal medio diario es 0.23 m<sup>3</sup>/segundo con un rendimiento hídrico de 3.47 l/s-Km<sup>2</sup>, tanto en años secos como en húmedos y en normales los rendimientos hídricos de la cuenca fueron bajos.

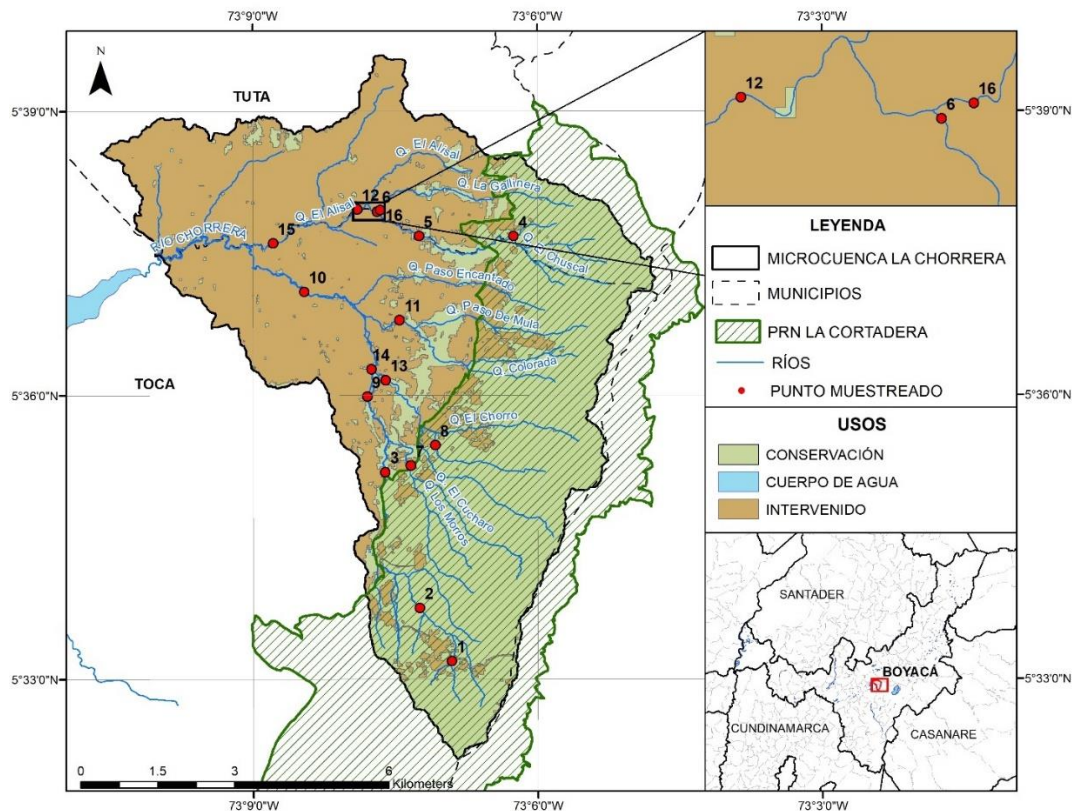
**Figura 6-34:** Curva de duración de caudales diarios microcuenca la chorrera.



## 6.5 Calidad de Agua

De los 16 puntos muestreados, los puntos 1, 2, 4, y 8 se encuentran ubicados dentro del del parque Regional Natural (PRN) la Cortadera; el punto 1 se ubica en la parte más alta de la cuenca a 3400 m.s.n.m. al sur de esta en sobre el río la Chorrera, y a pesar de estar ubicado en una zona conservada tiene influencia de actividad agropecuaria, el punto 2 se encuentra aguas abajo del punto 1 a 3296 m.s.n.m. sobre el río la Chorrera en una zona totalmente conservada, el punto 3 se ubica aguas abajo del punto 2 a 3018 m.s.n.m. sobre el río la Chorrera, se encuentra en una zona conservada pero tiene influencia de actividad agropecuaria, el punto 7 se ubica a 3031 m.s.n.m. sobre la quebrada los Monos en una zona de transición entre un área conservada y una intervenida, el punto 8 se ubica a 3019

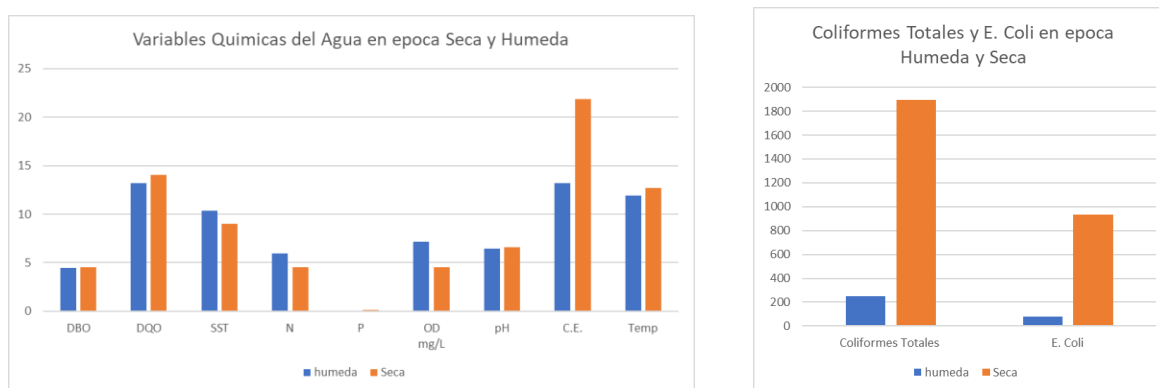
**Figura 6-35:** Ubicación de los puntos muestreados por uso de suelo en la microcuenca la Chorrera.



El punto 14 se ubica a 2805 m.s.n.m. y también se encuentra en la parte media de la cuenca. Este punto tiene poca vegetación riparias , tiene influencia directa de actividad agropecuaria y recibe las aguas de los puntos 9 y 13. El punto 11 se ubica a 2832 m.s.n.m. sobre la quebrada paso de la mula la cual recibe las aguas de la quebrada Colorada y entrega las aguas al río La Chorrera aproximadamente 800 metros aguas abajo. El punto 10 está ubicado a 2730 m.s.n.m. en la parte media de la cuenca sobre el río la chorrera y tiene influencia directa de actividad agropecuaria, el punto 4 se ubica al nororiente de la cuenca a 3016 m.s.n.m. en la parte alta de la cuenca y de la quebrada El Chuscal en una zona en conservación. El punto 5 se ubica aguas abajo del punto 4 a 2823 m.s.n.m. sobre la quebrada El Chuscal y a pesar de estar protegido por vegetación riparía nativa, la zona

se encuentra influenciada por actividad agropecuaria. El punto 6 se encuentra en la zona media de la cuenca a 2771 m.s.n.m. aguas debajo del punto 5 en una zona de actividad agropecuaria. El punto 16 recoge las aguas de la quebrada La Gallinera y se encuentra a 2776 m.s.n.m. a 11 metros antes de entregar sus aguas a la quebrada El Alisal en zona de actividad agropecuaria. El punto 12 se ubica a 2761 m.s.n.m. sobre la quebrada el alisal y recibe las aguas de los puntos 6 y 16. Finalmente el punto 15 se encuentra a 2716 m.s.n.m. aguas abajo del punto 12 sobre la quebrada el Alisal como se ilustra en la Figura 6-35.

**Figura 6-36:** calidad de agua en los puntos muestreados para época húmeda y seca



En estos puntos muestreados se encontró que en promedio La demanda Química de Oxígeno para época seca fue de 14.02 mg/L  $O_2$ , con un mínimo de 0.49 y de 13.21 mg/L  $O_2$  en época húmeda, para la época húmeda los puntos que mostraron menor DQO fueron los punto 8 y 9 y para época seca los puntos 4,5 y 6 mostraron los DQO más bajos, los valores de DQO más altos para época húmeda fueron observados en los puntos 3, 14 y 15 y para época seca en los puntos 1,2,3,10 y 14, como se ilustra en la Figura 6-36.

**Figura 6-37:** Demanda Química de Oxigeno por época en los puntos muestreados.

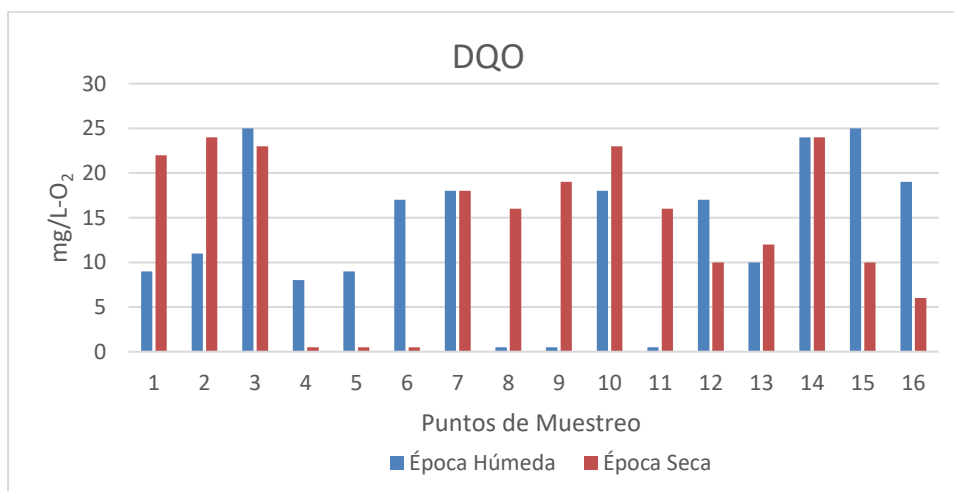
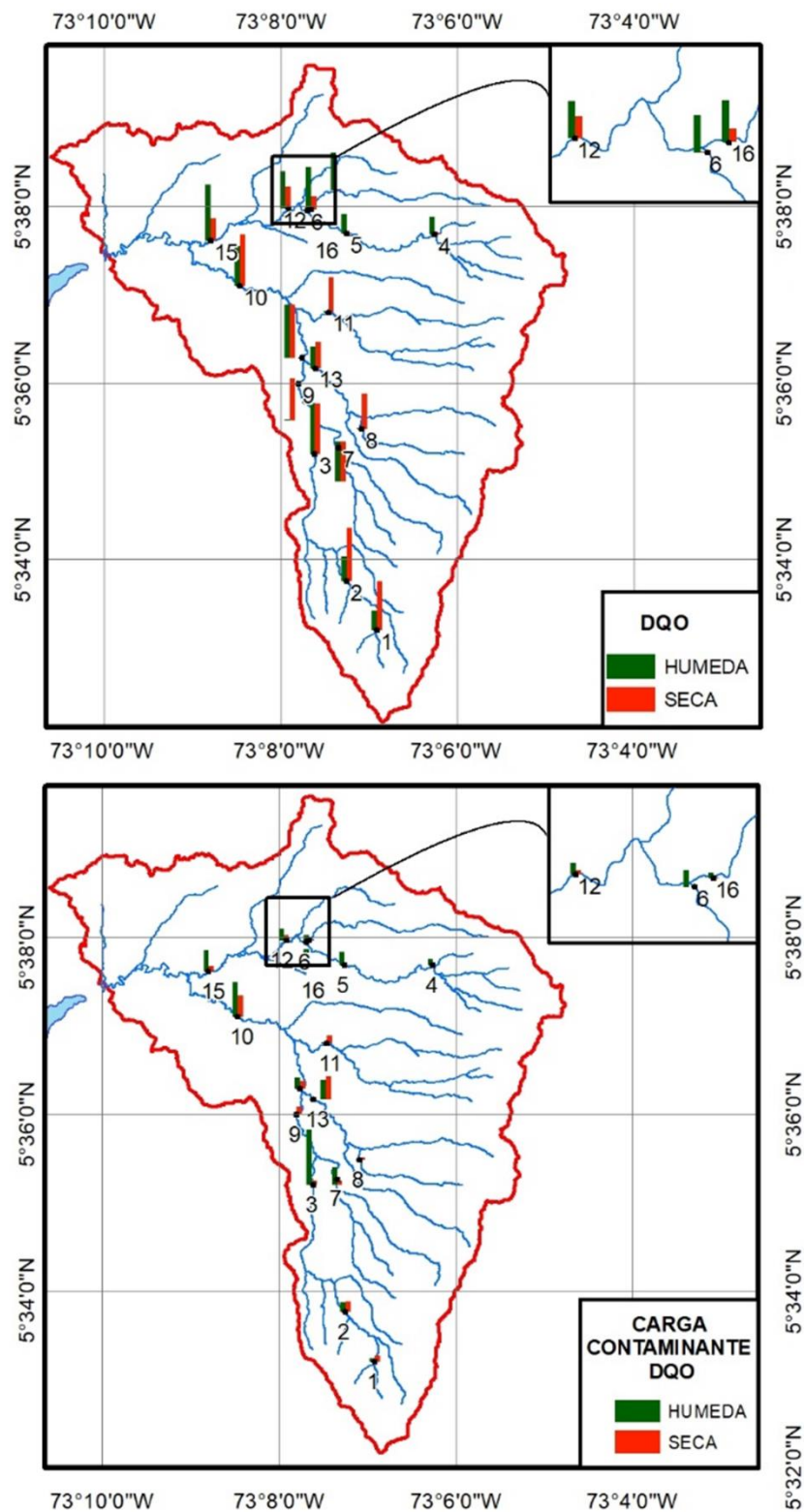


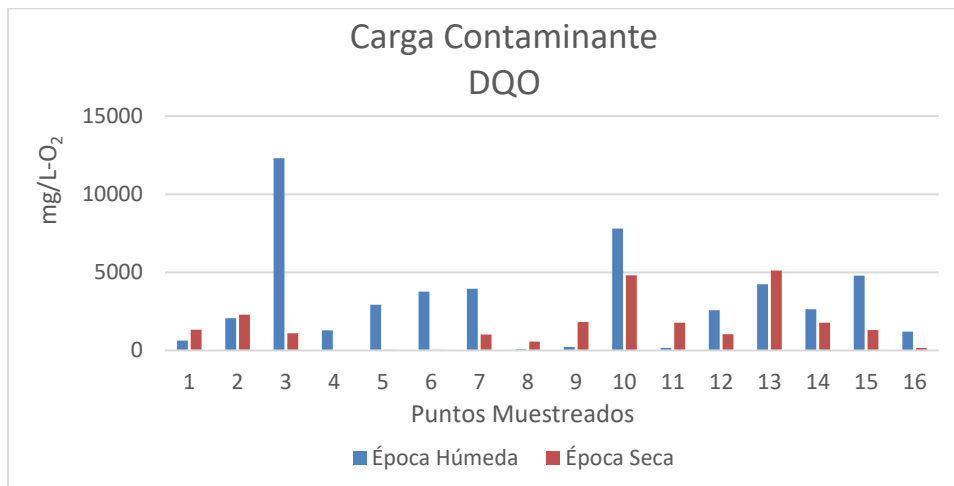
Figura 6-38: Cambios espaciales de la DQO y de su carga contaminante.





En la época Húmeda los tramos del punto 1 al 3 y del punto 4 al 6 mostraron acumulación de la carga contaminante de DQO, empezando con bajos DQO en los puntos altos en zonas conservadas y aumentando aguas abajo. El tramo entre el punto 6 a 12 mostró una ligera disminución de la carga contaminantes a pesar de recibir carga del punto 16. El tramo del punto 3 al 14 mostró un ligero aumento en la carga a pesar de recibir las aguas de los puntos 7 y 8 lo cuales presentaron baja carga contaminante Figura 6-37.

**Figura 6-39:** Carga contaminante de Demanda Química de Oxígeno por época en los puntos muestreados.



La demanda Biológica de Oxígeno promedio para época seca fue de 4.56 mg/L O<sub>2</sub> y para época húmeda fue de 4.48 mg/L O<sub>2</sub>, los valores de DQO más altos en época seca fueron observados en los puntos 1,3,8 y 9, y los más bajos en los puntos 4,5,6 y 13, para época húmeda los valores de DBO más altos se observaron en los puntos 14 y 15, y los valores más bajos en los puntos 8,9 y 11 (Figura 6-40).

**Figura 6-40:** Demanda Biológica de Oxígeno por época en los puntos muestreados.

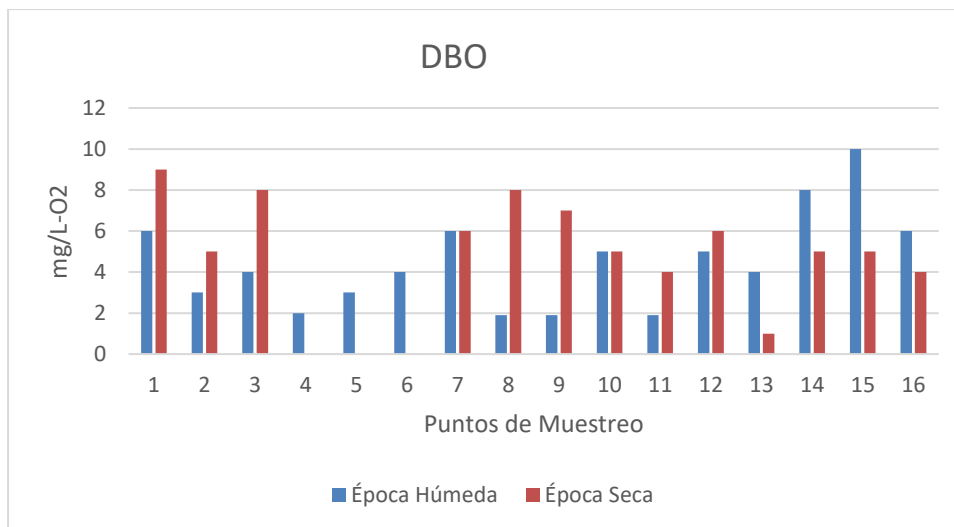
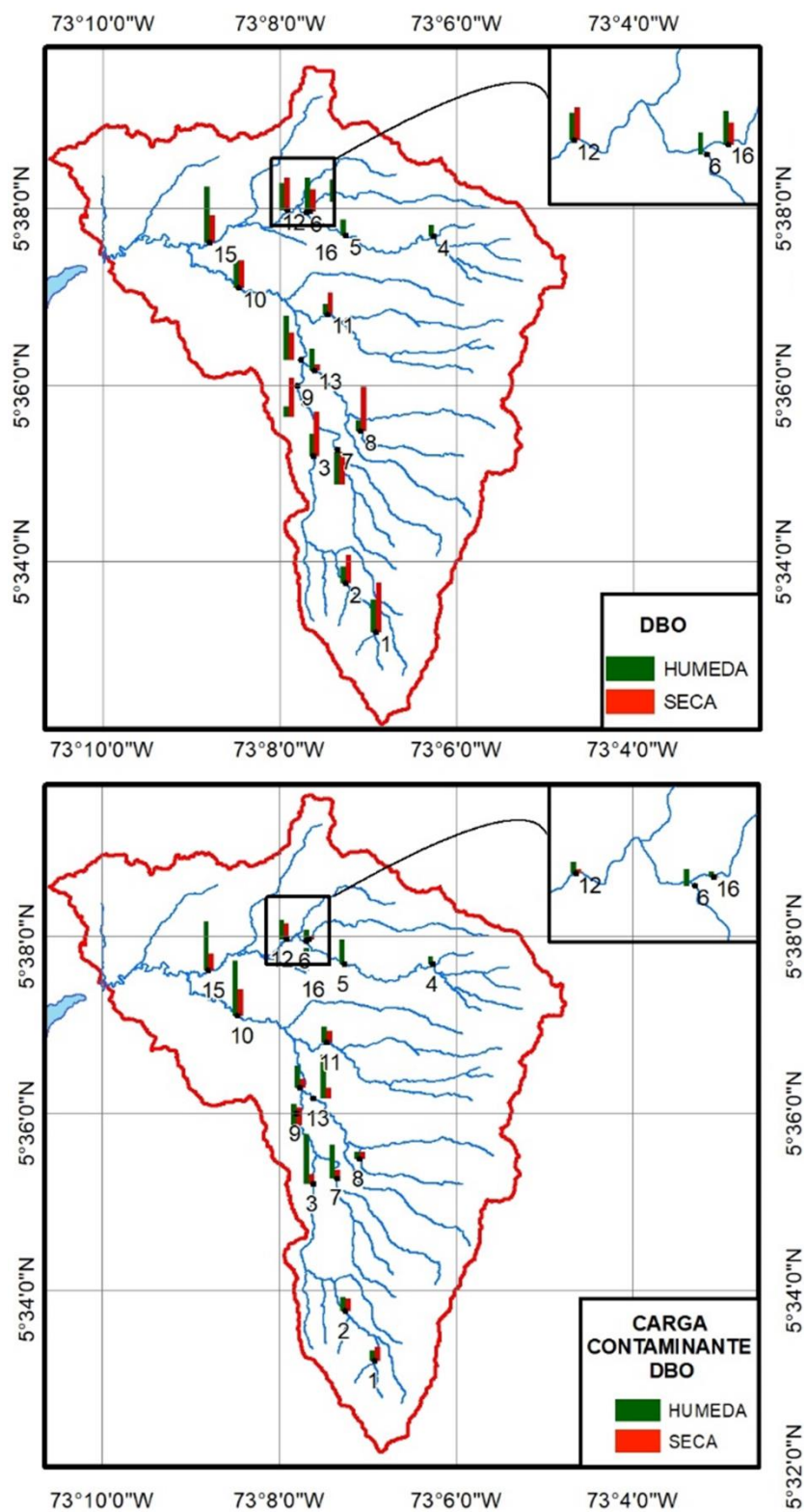




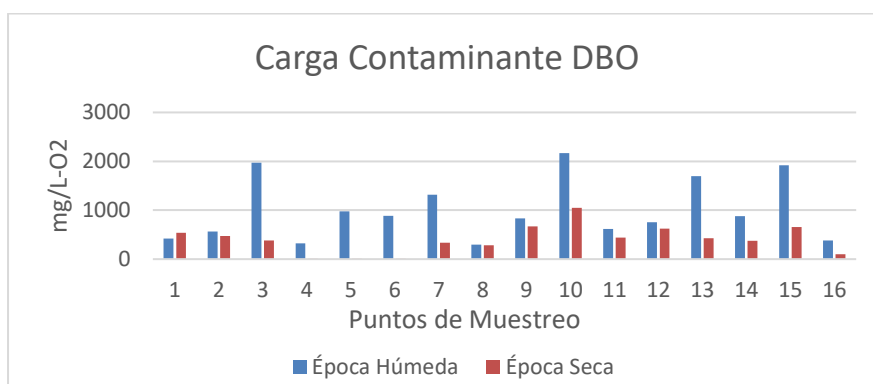
Figura 6-41: Cambios espaciales de la DBO y de su carga contaminante.



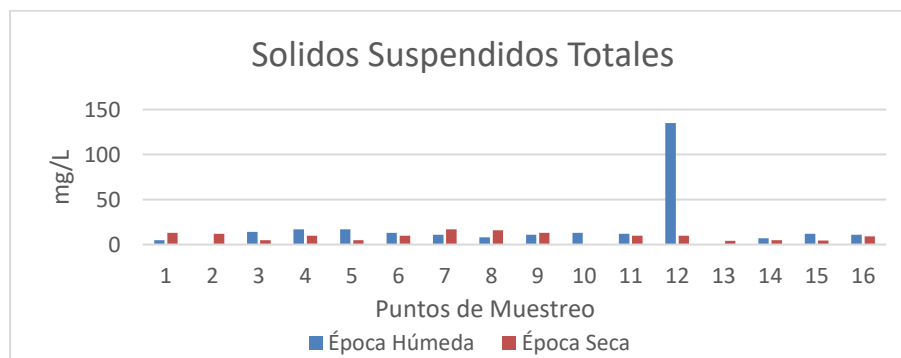
En la Figura 6-38 se observa que en la época seca, la carga contaminante de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el tramo 4-6 fue baja y mostró una ligera acumulación. Los puntos ubicados sobre zona conservada de páramo mostraron baja carga contaminante. El tramo entre el punto 6 y 12 que recibe las aguas del punto 16 mostró un ligero aumento de la carga contaminante. El tramo entre el punto 3 y 14 mostró un ligero aumento en la carga contaminante a pesar de recibir las aguas del punto 13 con una importante carga contaminante y del punto 7 el cual mostró bajas cargas contaminantes como se observa en la Figura 6-39. En términos generales la carga contaminante de DQO fue menor en época seca, esto puede ser debido a que en época húmeda hay más arrastre de residuos de agroquímicos y otras moléculas por escorrentía (Figura 6-39).

En la Figura 6-41 se observa que para época húmeda entre los puntos 1 y 2 se observó una ligera acumulación de carga contaminante de DBO y un fuerte aumento en el punto 3, probablemente debido a un importante aumento en la actividad agropecuaria en las zonas cercanas a este punto. El tramo entre el punto 3 y 14 mostró una disminución de la carga contaminante posiblemente debido a que recibió las aguas provenientes de los puntos 7 y 8 que mostraron baja carga contaminante. El tramo entre el punto 5 al 12 recibió una baja carga del punto 16 y presentó una disminución en la carga; los puntos 10 y 15 estuvieron entre los puntos que más carga presentaron (Figura 6-42).

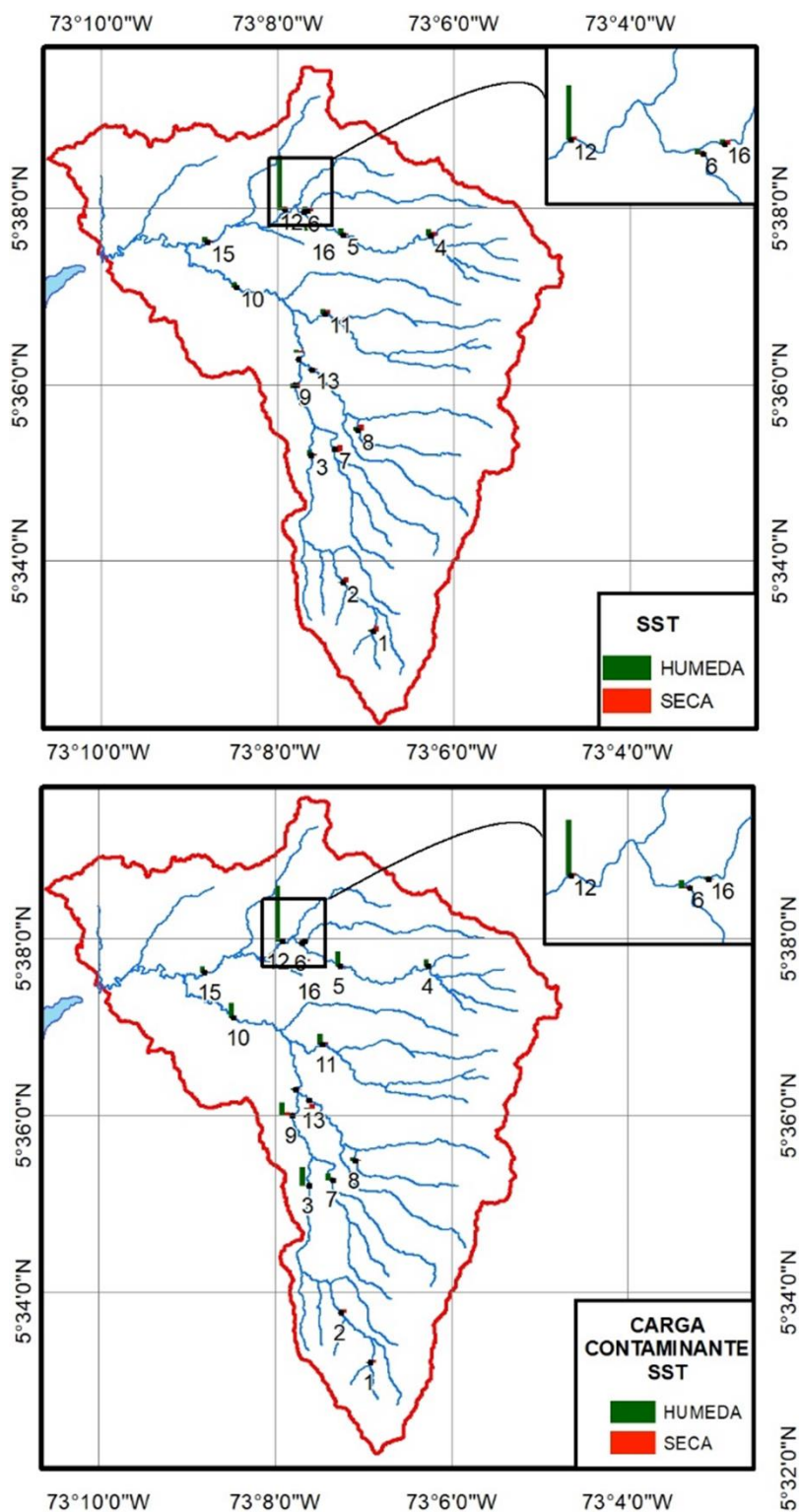
**Figura 6-42:** Carga Contaminante de Demanda Química de Oxígeno por época en los puntos muestreados.



**Figura 6-43:** Sólidos Suspendedos Totales por época en los puntos muestreados.



**Figura 6-44:** Cambios espaciales de los sólidos suspendidos totales y de su carga contaminante.



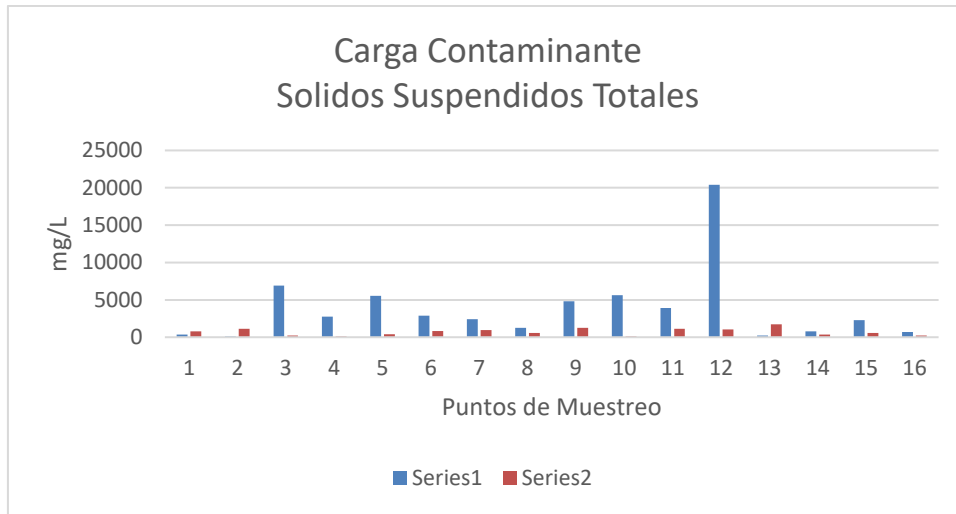
En época seca la carga contaminante del DBO para el tramo entre el punto 1 al 3 mostró una disminución de la carga, para después aumentar en el punto 9. El punto 14, que recibe las aguas del punto 9 y 13 mostró una disminución respecto a la carga contaminante de los puntos 9 y 1. El tramo 1 al 3 presentó una disminución de la carga contaminante que se mantuvo hasta el punto 6 para después aumentar en el punto 12 luego de recibir una baja carga proveniente del punto 16. El punto 10 al igual que en época seca mostró la mayor carga de contaminantes, y el punto 11 mantuvo una carga muy similar en las dos épocas. En términos generales las cargas de DBO en época húmeda fueron mayores, que al igual que las cargas de DQO, donde una de las razones pudo el arrastre de material orgánico por escorrentía (Figura 6-42).

El promedio de Sólidos Suspendidos Totales (SST) para época Húmeda fue de 17.93 mg/L y de 8.99 mg/L para época seca. Los valores más altos de SST en época seca se observaron en los puntos 7 y 8 y los más bajos en los puntos 10, 13, 15, 14, 3 y 5. Para la época húmeda los valores más alto se observaron en los puntos 12, 4 y 5, siendo el valor del punto 12 diez veces superior al promedio de los demás puntos. Los valores más bajos para época húmeda se observaron en los puntos 2, 13 y 1. Para el caso particular del punto 12 se observaron señales recientes de un evento extremo asociado a un aumento de caudal que superó el nivel del puente presente sobre la quebrada El Alisal. Este evento transportó sedimentos y sólidos que fueron depositadas en las zonas de inundación cerca al río (Figura 6-43).

En la Figura 6-44 Para la época húmeda, el tramo entre el punto 1 y 2 presentó baja carga de SST para aumentar considerablemente en el punto 3 y disminuir en el punto 9 después de recibir la carga proveniente del punto 7. El punto 14 mostró una disminución de la carga de SST después de recibir las aguas del punto 9 y 13. El punto 13 presentó una disminución de la carga respecto al punto 8, y los puntos 10 y 15 que tienen mayor influencia de actividad agropecuaria presentaron cargas contaminantes bajas (Figura 6-45).

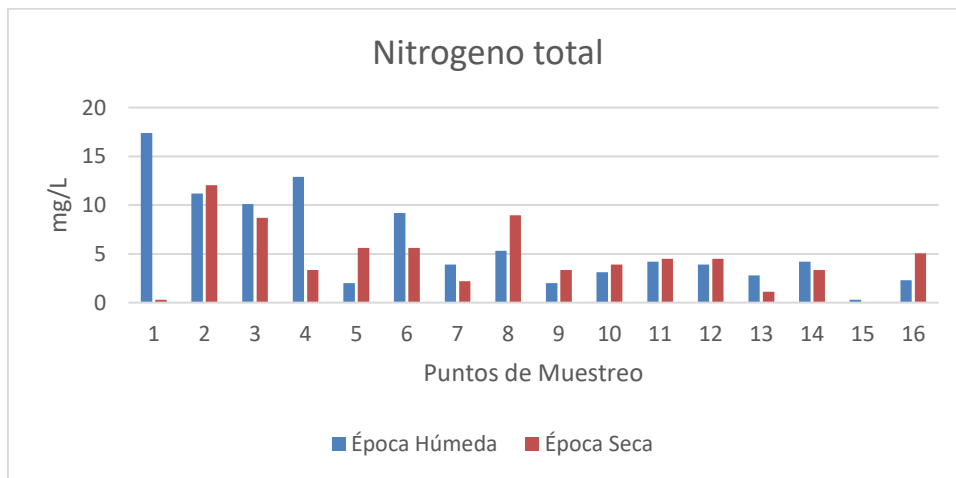
En época seca todos los puntos presentaron una carga contaminante de SST baja, con ligeros aumentos en los tramos de los puntos 3 al 9, y en el tramo del punto 8 al 13. Además, se observó una ligera acumulación en el tramo entre los puntos 4 y 12. Al igual que en la época húmeda, los puntos 10 y 15 mostraron cargas bajas (Figura 6-45). En términos generales la carga contaminante de SST fue mayor en época húmeda, esto probablemente debido a que la lluvia transportó material particulado por escorrentía.

**Figura 6-45:** Carga contaminante de Solidos Suspendidos Totales por época en los puntos muestreados.

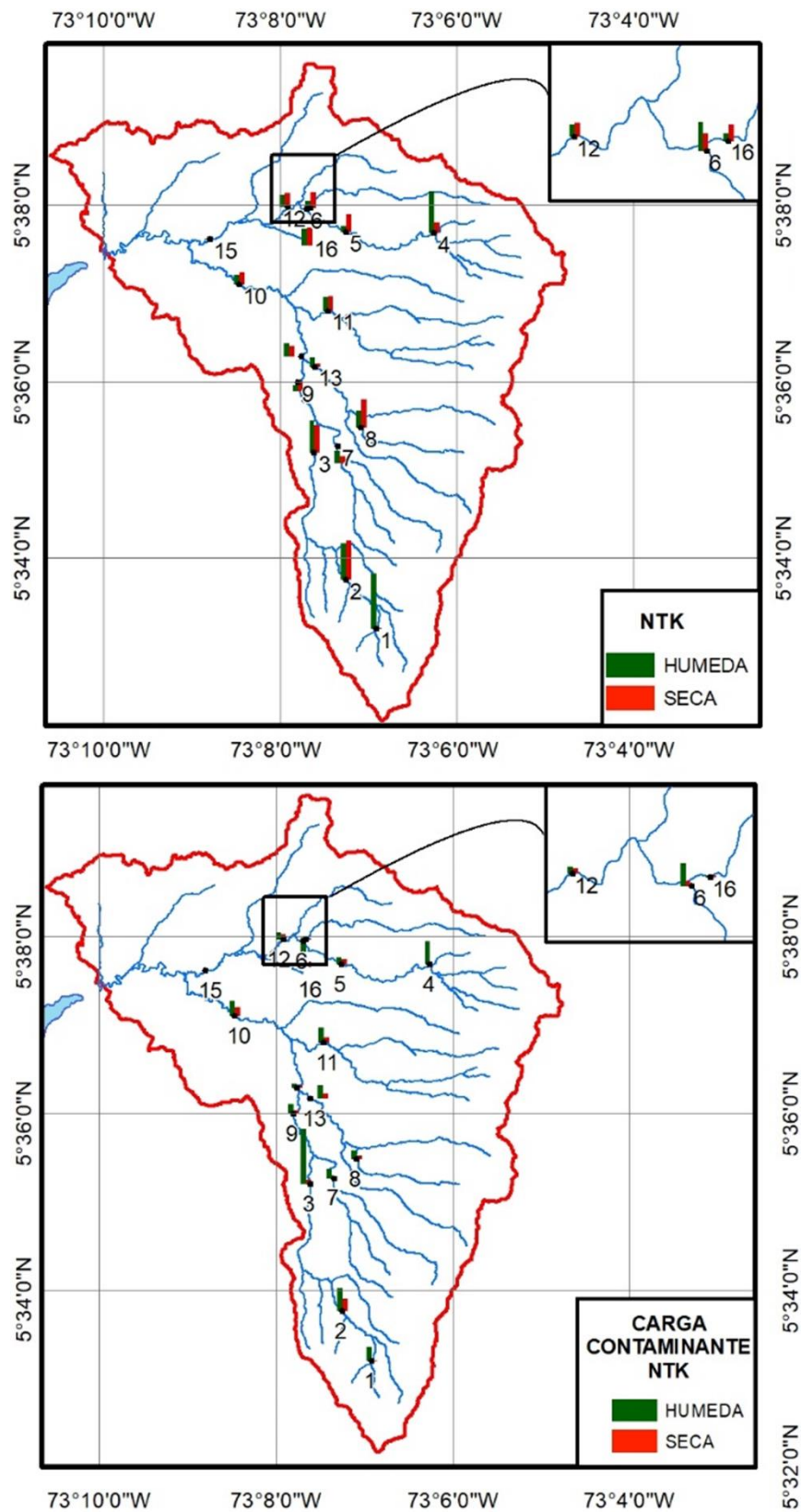


El promedio de nitrógeno en el agua fue de 5.9 mg/L para época húmeda y 4.5 para época seca. Los valores más altos de Nitrógeno total en época seca se presentaron en los puntos 2, 3 y 8 y los más bajo en los puntos 15, 13 y 1. Para la época húmeda los valores más altos se presentaron en los puntos 1, 2, 3, y 4, y los valores más bajos en los puntos 15, 16, 5 y 9 (Figura 6-46).

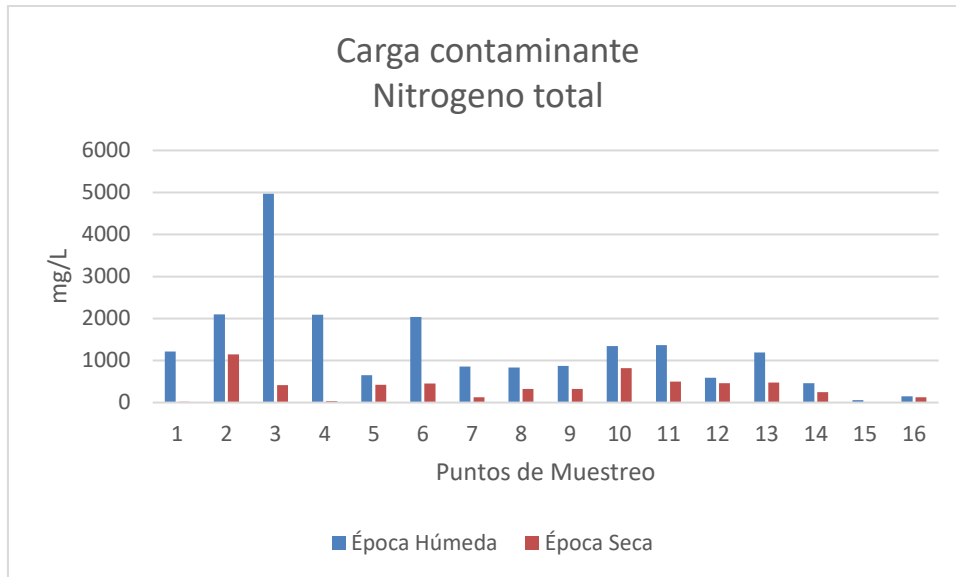
**Figura 6-46:** Nitrógeno Total por época en los puntos muestreados.



En la Figura 6-47 se observa que para época húmeda la carga contaminante de Nitrógeno Total el tramo 1 al 3 se acumuló para posteriormente disminuir la carga en el punto 9 luego de recibir las aguas del punto 7 con una carga baja. El punto 14 presentó una disminución de la carga contaminante luego de recibir las agua del punto 9 y 13; el punto 5 disminuyó la carga respecto al punto 4 para después aumentar en el punto 6 y seguir disminuyendo aguas abajo en el punto 12 y punto 15. Los puntos 11 y 10 mostraron un comportamiento muy similar entre las dos épocas (Figura 6-48).

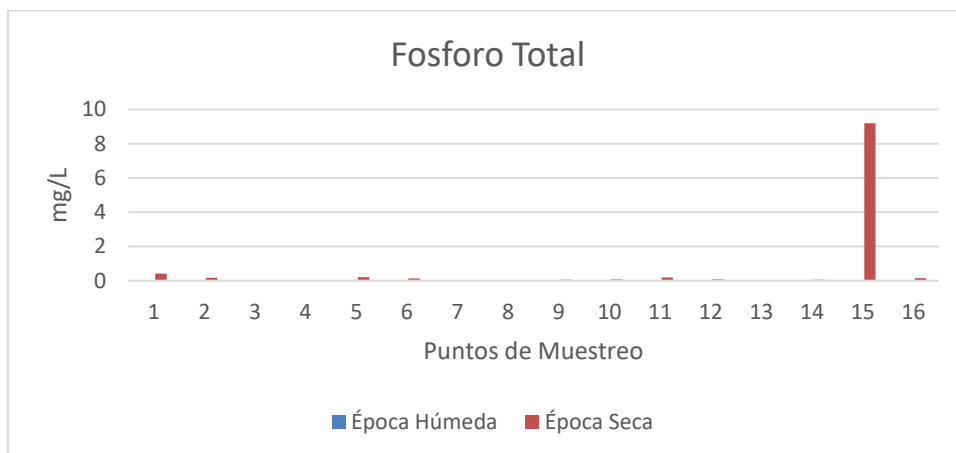
**Figura 6-47:** Cambios espaciales de los Nitrógeno total y de su carga contaminante.

**Figura 6-48:** Carga contaminante de Nitrógeno Total por época en los puntos muestreados.



Para época húmeda el promedio de Fósforo fue 0.01 mg/L y para época seca fue de 0.673 mg/L. Para época húmeda el fosforo fue bajo en todos los puntos con 0.01 mg/L, para época seca los valores más altos se presentaron en los puntos 1, 2, 5, 6, 15 y 16, donde el punto 15 mostró valores particularmente altos. Los valores más bajos para la época seca se observaron en los puntos 3, 4, 7, 8 y 13; con excepción del punto 15, todos los puntos mostraron bajos valores de fosforo (Figura 6-49).

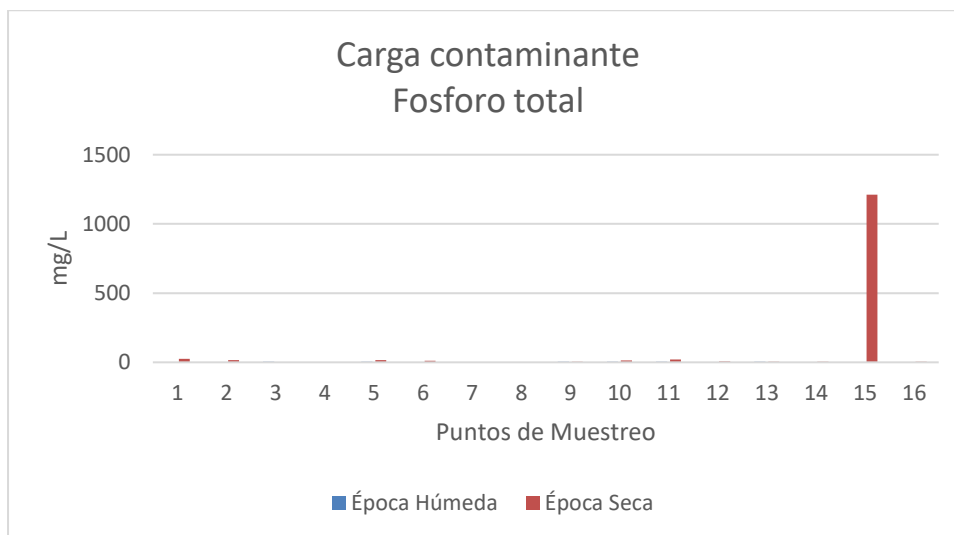
**Figura 6-49:** Fosforo Total por época en los puntos muestreados.



Para la época húmeda el tramo 1 al 3 presentó disminución de la carga contaminante de Fosforo total, la cual después aumentó un poco en el punto 9 después de recibir una carga baja del punto 7. El punto 5 presentó un aumento en la carga contaminante respecto al punto 4 para después disminuir un poco en el punto 6 y seguir disminuyendo en el punto 12 y en el punto 15. El punto 10 presentó una disminución de la carga contaminante

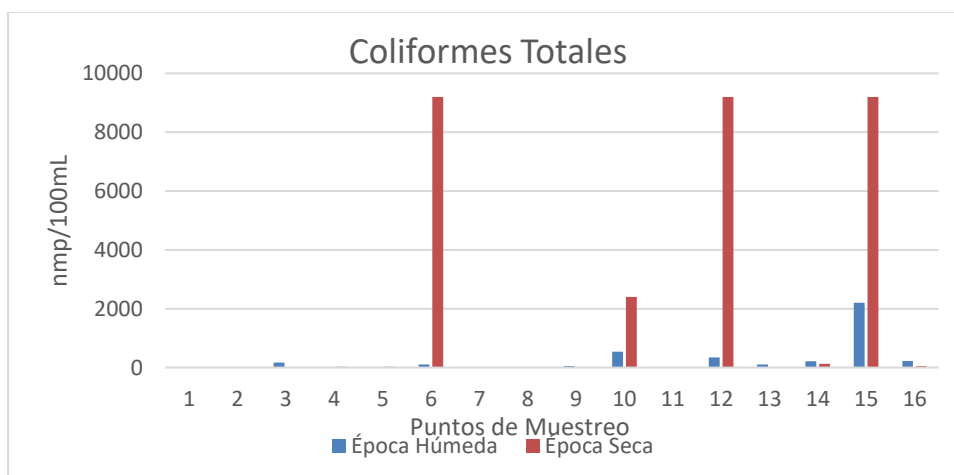
respecto al punto 11 y un aumento respecto al punto 14, el punto 15 presentó una carga particularmente alta, probablemente a la influencia que recibe de la actividad agropecuaria (Figura 6-50).

**Figura 6-50:** Carga contaminante de Fosforo Total por época en los puntos muestreados.



En promedio los valores de Coliformes Totales para época seca fueron de 1896 nmp/100ml y de 250.3 nmp/100ml en época Húmeda. El valor más alto en época seca se observó en los puntos 6, 10, 12 y 15 y los más bajos en los puntos 8, 7 y 11. Para la época Húmeda los valores más altos de Coliformes totales se presentaron en los puntos 10, 12, 15 y los más bajos en los puntos 2,3,5 y 8 (Figura 6-51).

**Figura 6-51:** Coliformes Totales por época en los puntos muestreados.

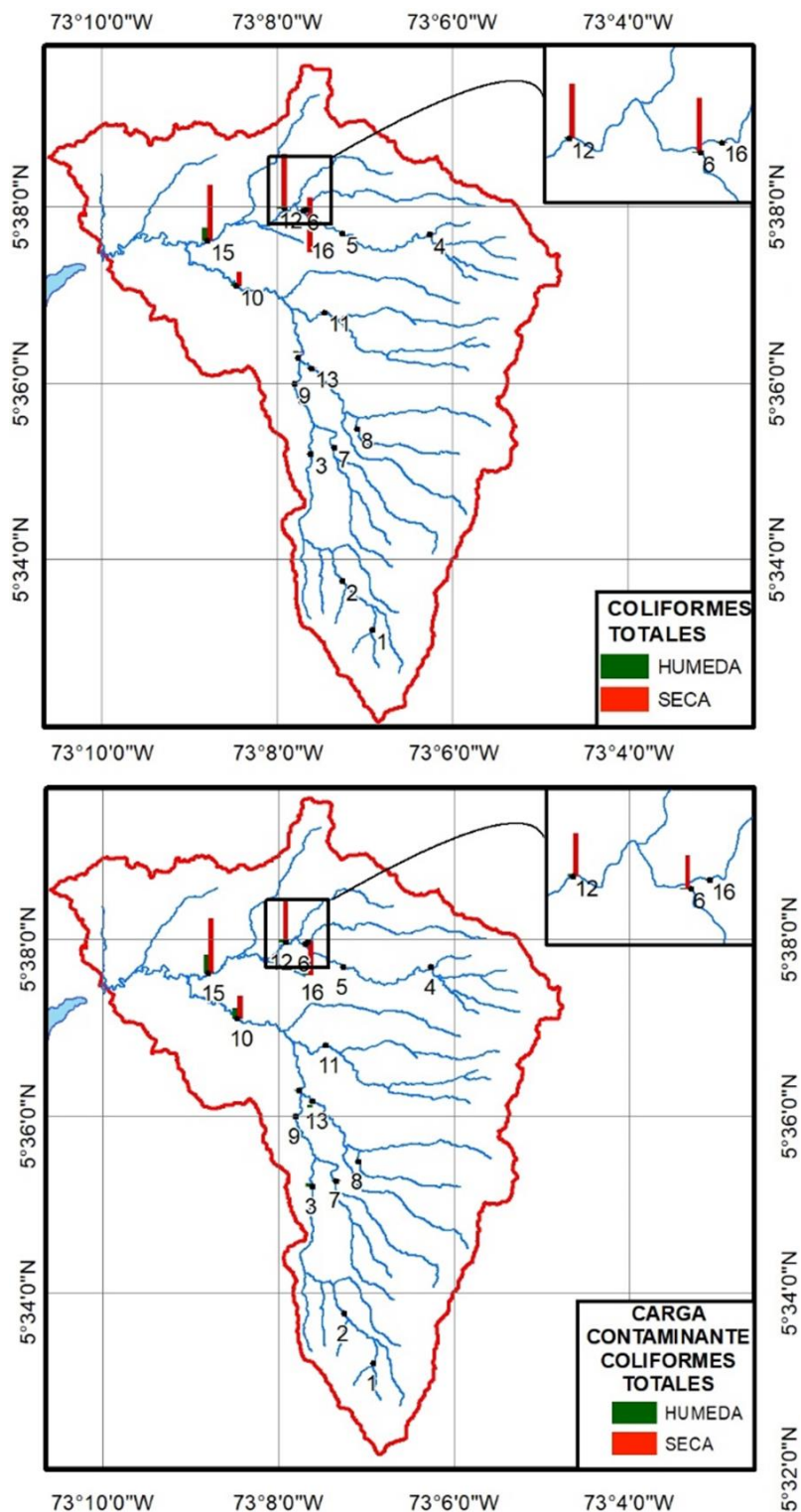


En la Figura 6-52 se observa que para época húmeda la carga contaminante de Coliformes Totales fue muy baja para casi todos los puntos muestreados con excepción de los puntos 10 y 15. Para la época seca al igual que en húmeda la mayoría de los puntos presentó bajas cargas de contaminantes por Coliformes Totales con excepción de los puntos 6, 10,

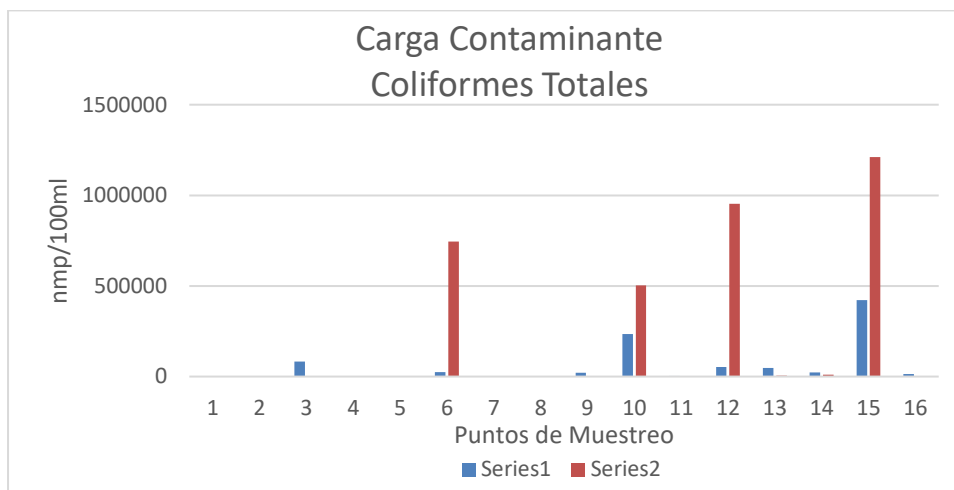


12 y 15 los cuales se encuentran ubicados en la parte media baja de la microcuenca y recibiendo mayor influencia de actividad antrópica (Figura 6-53).

**Figura 6-52:** Cambios espaciales de Coliformes Totales y de su carga contaminante.

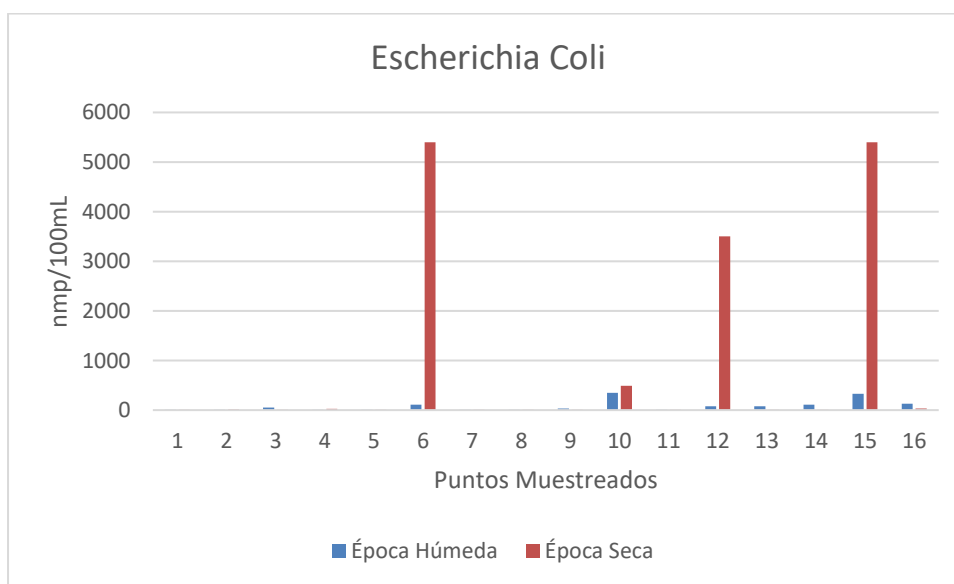


**Figura 6-53:** Carga contaminante de Coliformes Totales por época en los puntos muestreados.



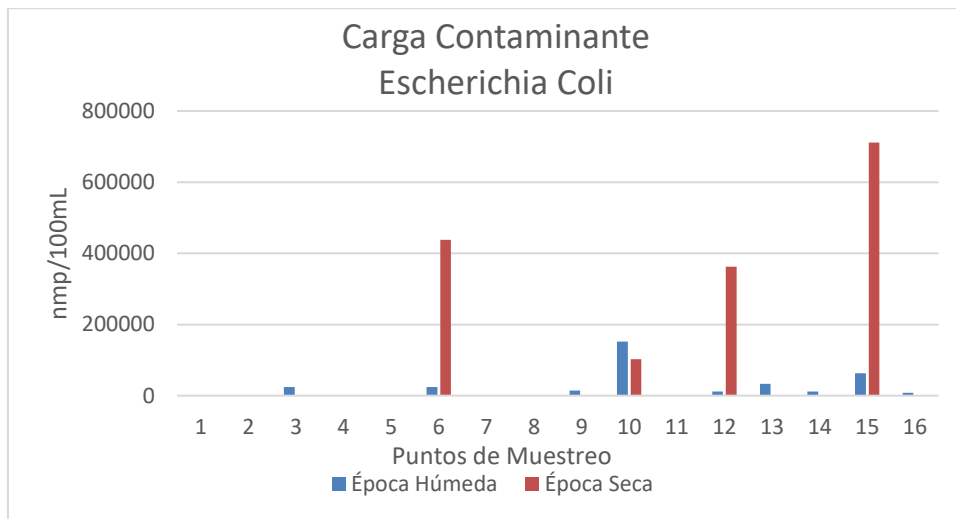
En promedio los valores de *Escherichia Coli* para época seca fue de 930.8 nmp/100ml y de 80.59 nmp/100ml en época Húmeda; el valor más alto en poca seca se observó en los puntos 10, 6, 12 y 15 y los más bajos en los puntos 8,1 y 11. Para la época Húmeda los valores más altos de *Escherichia Coli* se presentaron en los puntos 10 y 15 y los más bajos en los puntos 2, 4, 5, 8 y 7 (Figura 6-54), para las dos épocas las zonas que presentaron mayores valores de *Escherichia Coli* se caracterizaron por estar intervenidas por actividad agropecuaria, mientras que los valores bajos fueron observados en zonas de páramo.

**Figura 6-54:** *Escherichia Coli* por época en los puntos muestreados.



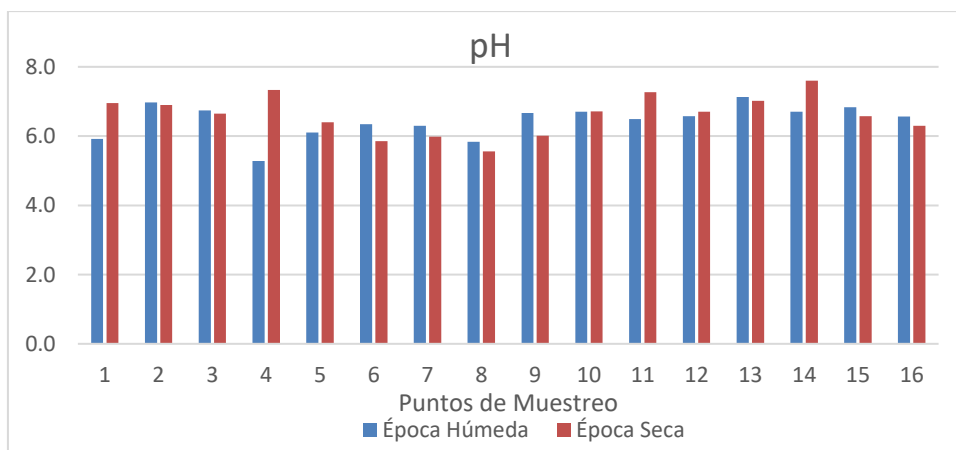
La carga contaminante por *Escherichia Coli* al igual que en el caso de la carga por Coliformes Totales presentó bajos valores con excepción de los puntos 6, 10, 13 y 15 que en época húmeda mostraron valores más altos, y los puntos 10 y 15 que mostraron valores ligeramente más altos a los demás puntos muestreados en época húmeda (Figura 6-55), para las dos épocas muestreadas, los tramos que reportaron mayores cargas contaminantes de *Escherichia Coli* presentaron mayor actividad agropecuaria, lo cual puede explicar estos valores altos.

**Figura 6-55:** carga contaminante de *Escherichia Coli* por época en los puntos muestreados.



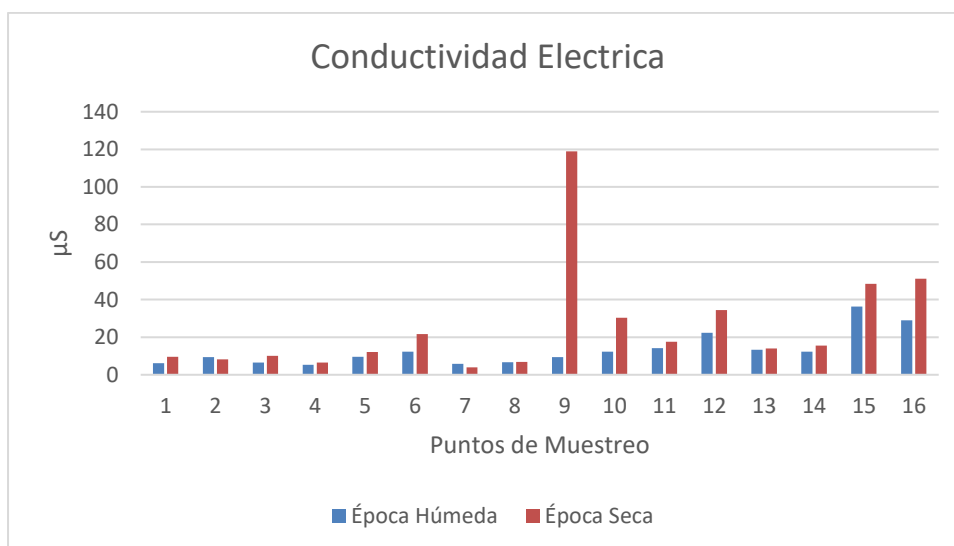
En promedio los valores de *pH* para época seca fueron de 6.6 y de 6.4 en época Húmeda; el valor más alto de *pH* en poca seca se observó en los puntos 4, 14 y 11 y los más bajos en los puntos 6, 7, 8 y 9; para la época Húmeda los valores más altos de *pH* se presentaron en los puntos 2 y 13 y los más bajos en los puntos 1, 4 y 8 (Figura 6-56).

**Figura 6-56:** *pH* del agua por época en los puntos muestreados.



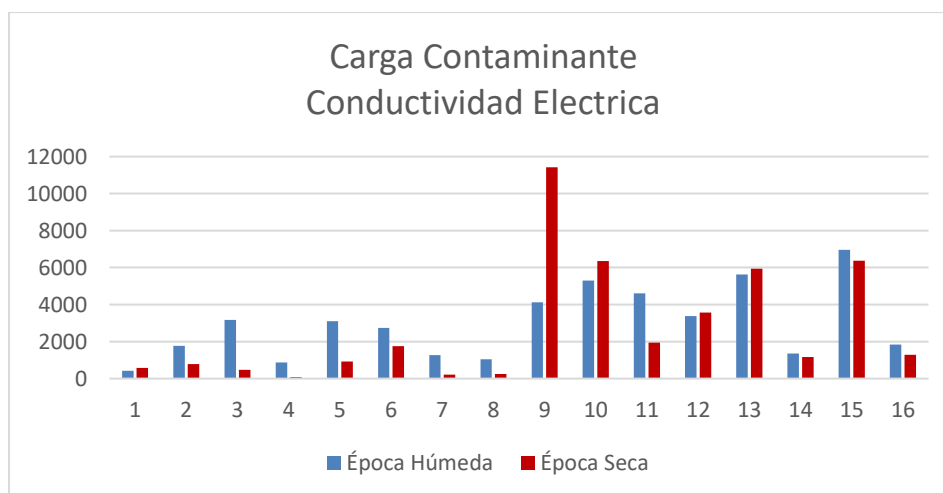
En promedio los valores de Conductividad Eléctrica para época seca fueron de 25.56  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y de 13.17  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en época Húmeda; el valor más alto en poca seca se observó en los puntos 12, 15, 16 y 9 y los más bajos en los puntos 7, 4 y 8; para la época Húmeda los valores más altos de Conductividad eléctrica se presentaron en los puntos 15, 16 y 12 y los más bajos en los puntos 4, 7, 1, 8 y 3.

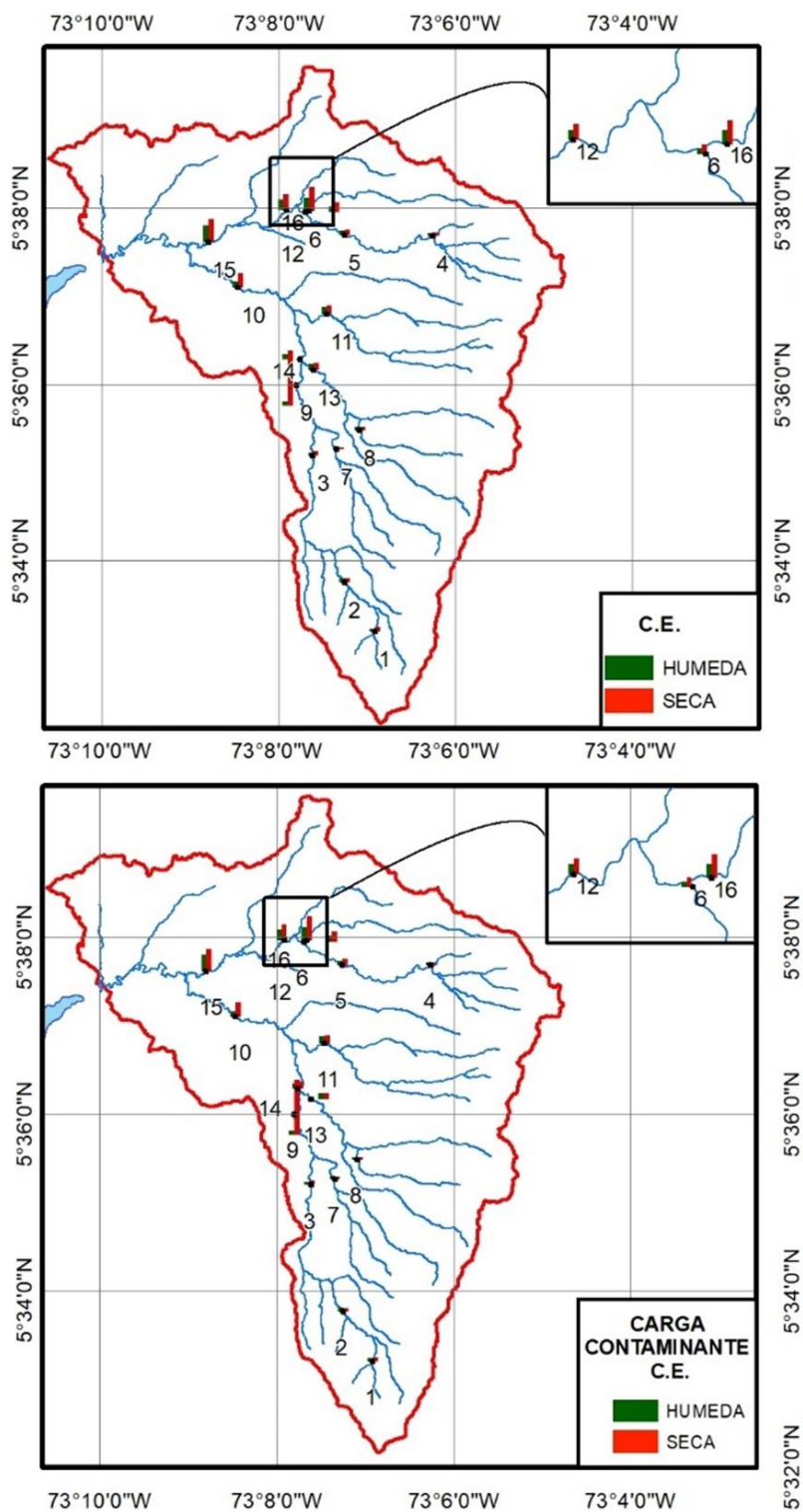
**Figura 6-57:** Conductividad Eléctrica del agua por época en los puntos muestreados.



En la Figura 6-59 se puede observar que la carga contaminante de sales (conductividad eléctrica) presentó bajos valores en los puntos del 1 al 8 para las dos épocas de muestreo, esto puede ser debido a que estos puntos se ubicaron en la parte alta de la cuenca donde la influencia de actividad agropecuaria es menor, mientras que los puntos del 9 al 16 mostraron valores mucho más altos en las dos épocas de muestreo para las dos épocas de muestreo a excepción del punto 14 que mostró valores bajos (Figura 6-58).

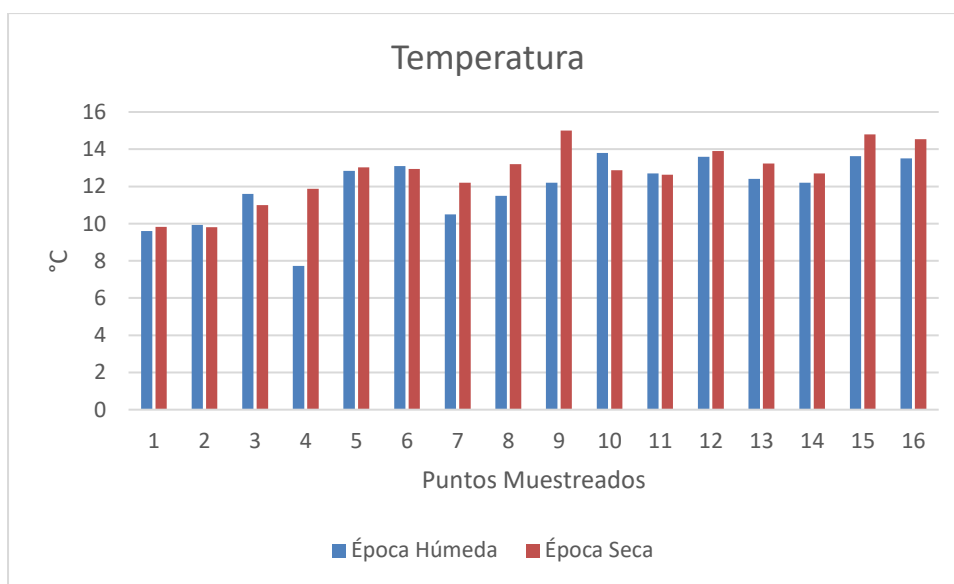
**Figura 6-58:** carga contaminante de Conductividad Eléctrica por época en los puntos muestreados.



**Figura 6-59:** Cambios espaciales de Conductividad Eléctrica y de su carga contaminante.

En promedio la temperatura del agua para época seca fue de 12.7 °C y de 11.9 °C en época Húmeda; el valor más alto en poca seca se observó en los puntos 9, 15 y 16 y los más bajos en los puntos 1, 2 y 3, para la época Húmeda las temperaturas de agua más altas se presentaron en los puntos 10, 12 y 15 y los más bajos en los puntos 4, 1 y 2, todos los puntos temperaturas similares para las dos épocas de muestreo, a excepción del punto cuatro que aumento casi 4° en época seca (Figura 6-60).

**Figura 6-60:** Temperatura por época en los puntos muestreados.



Según la resolución 631 de 2015 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas a cuerpos de aguas superficiales de las actividades productivas de agroindustria y ganadería son: pH entre 6 a 9, DQO máximo de 150 mg/L O<sub>2</sub>, DBO máximo de 50 mg/L O<sub>2</sub> y Sólidos suspendidos totales máximo de 100 mg/L para procesamiento de hortalizas, frutas, legumbres, raíces y tubérculos.

Para el caso de ganadería de bovinos, bufalinos, equinos, ovinos y/o caprinos la resolución recomienda que los valores máximos de pH estén entre 6 a 9, DQO máximo de 500 mg/L O<sub>2</sub>, DBO máximo de 250 mg/L O<sub>2</sub> y Sólidos suspendidos totales máximo de 150 mg/L.

Para el caso del pH el punto 1, 4 y 8 en época húmeda presentaron pH de 5.92, 5.28 y 5.83 respectivamente y el punto 8 en época seca presentó un valor de 5.85, a pesar que estos puntos tuvieron pH por debajo de lo recomendado por la resolución 631, los valores estuvieron cerca al 6 con excepción del 5.28 del punto 5, esto puede ser debido a que el punto se encuentra en límites de zonas con actividad agropecuaria y pudo verse influenciado por esta actividad.

Para el caso del DBO y el DQO todos los puntos estuvieron por debajo del máximo recomendado por la resolución 631, y los sólidos suspendidos totales estuvieron por debajo de lo recomendado para actividad ganadera, pero el punto 12 en época húmeda presentó 135 mg/L superando lo recomendado por la resolución 631 para actividad agrícola, esto se debe en gran medida a que en el momento del muestreo se presentaron señales reciente de una avenida que transportó gran cantidad de material particulado, evento que fue confirmado por los habitantes de la zona.

Para el Nitrógeno total la resolución 2215 del 2007 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, recomienda que los valores de Nitritos no sea superior a 10 mg/L y de 0.1 mg/L para Nitrito, los puntos muestreados presentaron valores para nitrógeno total superiores a 10 mg/L en los puntos 1, 2, 3 y 4 para época húmeda y en el punto 2 en época seca, cabe resaltar que todos estos puntos se ubican en zona de páramo, esto puede ser debido a que estas zonas al ser más conservadas presenta más vegetación que es que cae a la superficie con el tiempo y al presentarse más humedad en el ambiente se descompone y libera nitrógeno.

La resolución 2215 del 2007 recomienda que las concentraciones de Fosfatos no sean superiores a 0.5 mg/L, en los puntos muestreados todos los valores estuvieron por debajo de este rango a excepción del punto 15 en época seca que presentó 9.2 mg/L, valor particularmente alto, esto puede ser debido a que aguas arriba y cerca a este punto se encuentra un criadero de porcino que puede estar vertiendo aguas ricas en fosfatos.

Según la resolución 2215, se recomienda que no debe haber presencia de *Escherichia Coli* y Coliformes totales. En el presente estudio todos los puntos tuvieron presencia de *E. Coli* y coliformes totales, pero los puntos ubicados en zona de páramo presentaron valores inferiores a 17 nmp/100 ml con excepción del punto 3 que presentó 170 nmp/100 ml para época húmeda, mientras que los puntos ubicados en zona de transición y de actividad agropecuaria presentaron valores muy superiores llegando a las 9200 nmp/100 ml en los puntos 6, 12 y 15 para época seca, esto muy probablemente se deba a la actividad ganadera y porcina que se lleva a cabo en la cuenca.

La temperatura de todos los puntos estuvo dentro del rango observado en otros estudios de páramo y alta montaña como el realizado por (Calles, 2015)

## 6.6 Análisis Multivariado.

Se determinó el efecto de las variables Fisicoquímicas e hidráulicas sobre las comunidades de macroinvertebrados en la microcuenca La Chorrera con miras a determinar cuáles son las preferencias de hábitat de estas, para esto se implementaron métodos multivariados.

### 6.6.1 Análisis de Correspondencia Canónica

Para poder representar el diagrama de CCA de una manera más clara, se le asignó un código a cada una de las taxas de macroinvertebrados encontradas según su orden alfabético como se muestra en la Tabla 6-14. Además se hizo el análisis agrupando los datos según su ubicación (Páramo, Transición y Agricultura)

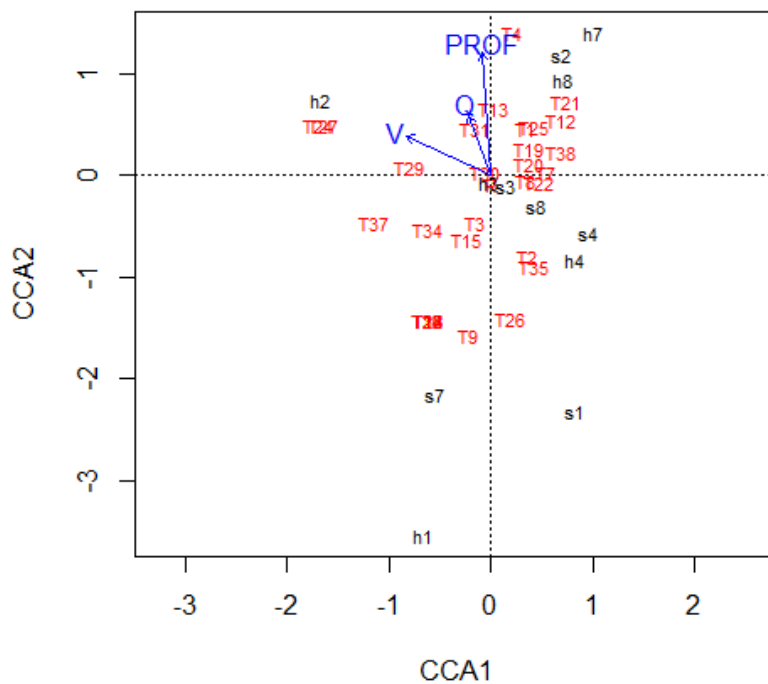
**Tabla 6-14:** códigos propuestos para taxas de macroinvertebrados

Taxa	codigo	Taxa	codigo	Taxa	codigo
Acari	T1	Entomobryidae	T14	Nematoda	T27
Amphipoda	T2	Formicidae	T15	Odonata	T28
Araneae	T3	Gerridae	T16	Oligochaeta	T29
Blattodea	T4	Glossosomatidae	T17	Oribatida	T30
Blephaeridae	T5	Grinidae	T18	Phygaenidae	T31
Branchyacetidae	T6	Helycopsychidae	T19	Polycentroodidae	T32
Ceratopogonidae	T7	Hirudinea	T20	Simuliidae	T34
Chironomidae	T8	Hydropsychidae	T21	Sphaeriidae	T35
Corixidae	T9	Hydroptilidae	T22	Spirobolida	T36
Cyclopoidea	T10	Larv_Col_sp1	T23	Thysanoptera	T37
Diadociidae	T11	Lepidoptera	T24	Tricoptera_sp1	T38
Ecnomidae	T12	Leptophlebiidae	T25	RIQUEZA	R
Elmidae	T13	Limoniidae	T26		

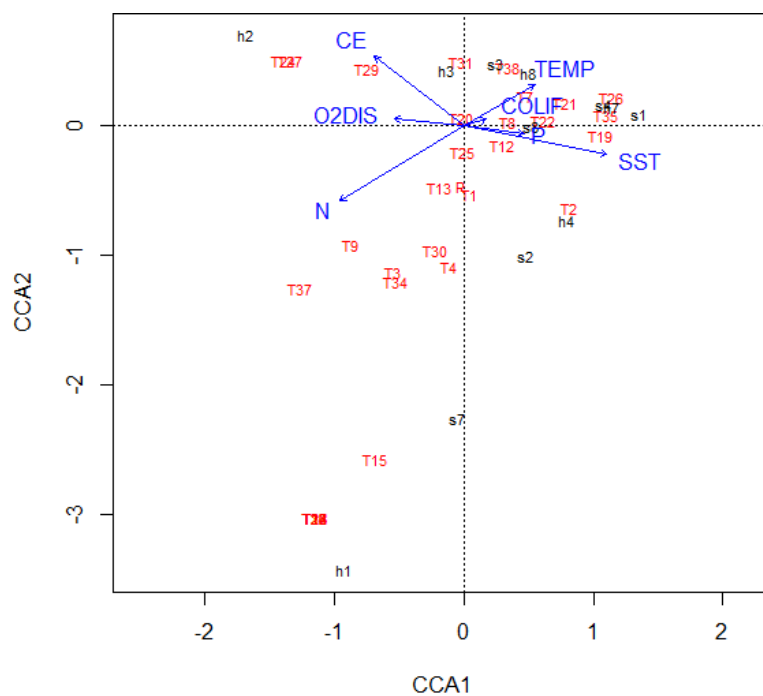
El diagrama CCA de las variables hidráulicas en puntos ubicados en zona de páramo muestran que la taxa Blattodea, Elmidae y Phygaenidae está asociada a profundidades y caudales altos, y la taxa Oligochaeta, Nematoda y Lepidoptera parecen ser sensibles a velocidades altas (Figura 6-61)



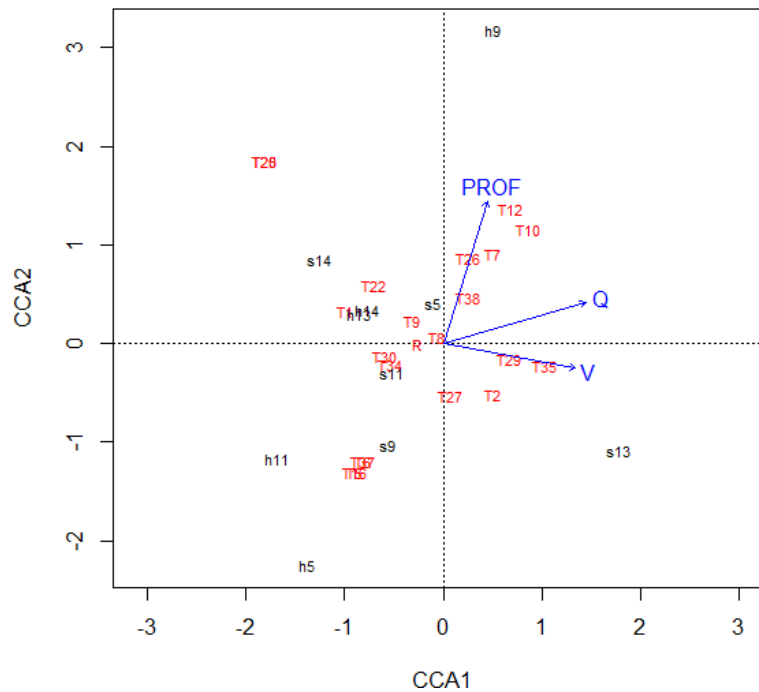
**Figura 6-61:** Análisis Canónico de Correspondencias entre variables hidráulicas y taxas en zona de páramo de la microcuenca la Chorrera



**Figura 6-62:** Análisis Canónico de Correspondencias entre variables Físico-Químicas y taxas en zona de páramo de la microcuenca la Chorrera



**Figura 6-63:** Análisis Canónico de Correspondencias entre variables hidráulicas y taxas en zona de Transición a páramo de la microcuenca la Chorrera

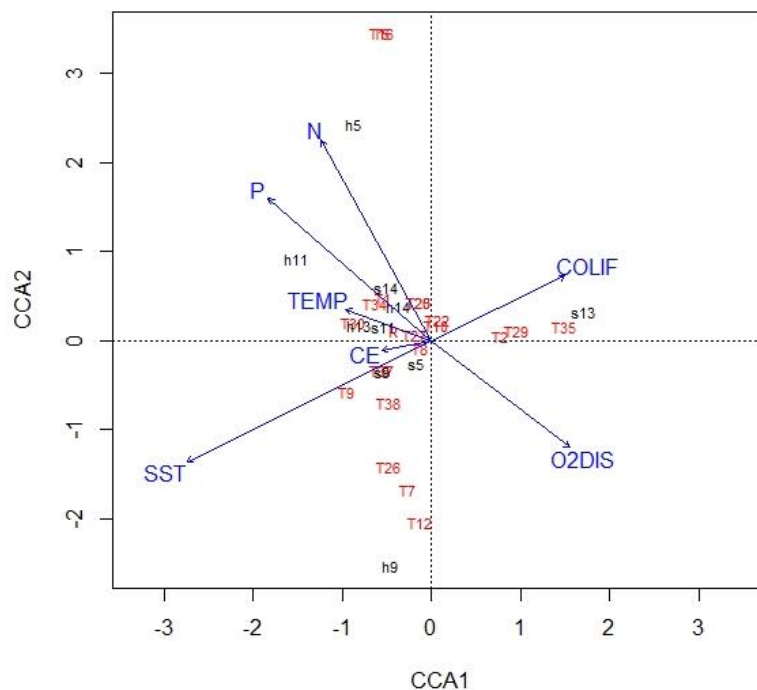


El diagrama CCA para variables físico-químicas en puntos ubicados en zona de páramo (Figura 6-62) muestran que las taxas Helycopsychidae, Sphaeriidae y Limoniidae muestran preferencia por altos Solidos Suspendidos Totales (SST) y bajo Oxígeno Disuelto (O2DIS). Las taxas Grinidae, Hydropsychidae y Hydroptilidae parecen mostrar preferencia por Fosforo (P) alto y bajo Oxígeno Disuelto, las taxas Nematoda y Lepidoptera muestran preferencia por Conductividades eléctricas (CE) altas y bajos Solidos Suspendidos Totales y las taxas Thysanoptera y Corixidae parecen preferir Nitrógeno (N) alto y bajas temperaturas (T), mientras que las taxas Tricoptera\_sp1 y Ceratopogonidae prefieren temperaturas más altas y bajo Nitrógeno.

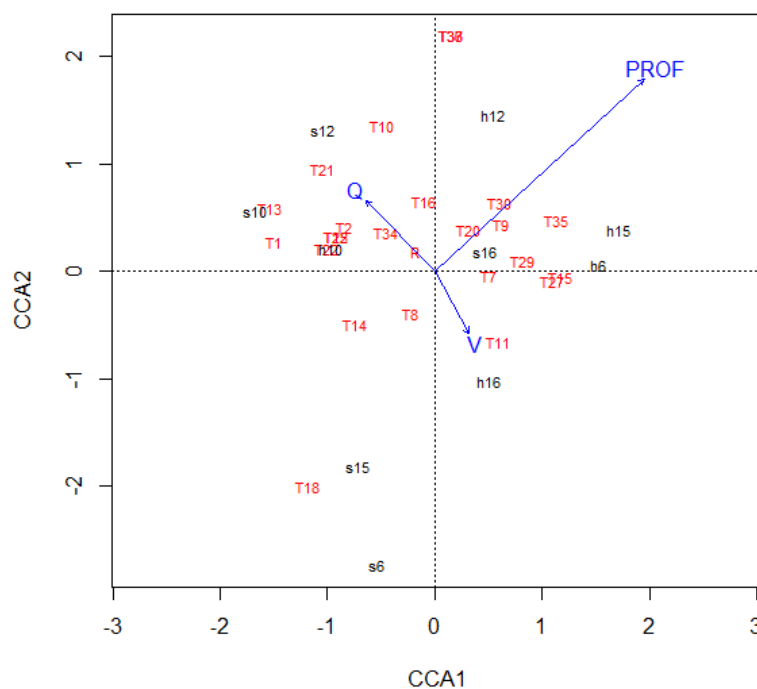
El diagrama CCA para variables hidráulicas en puntos ubicados en zona de transición entre páramo y agricultura muestran que las taxas Cyclopoidea, Ecnomidae, Limoniidae y Nematoda muestran preferencia a Profundidades altas y las taxas Oligochaeta y Sphaeriidae muestran preferencia por Velocidades y Caudales altos (Figura 6-63).

El diagrama CCA para variables físico-químicas en puntos ubicados en zona de transición entre páramo y agricultura muestran que las taxas Amphipoda, Oligochaeta y Sphaeriidae muestran preferencia por altos coliformes, alto Oxígeno disuelto y bajas temperaturas, mientras que la taxa Oribatida muestra preferencia por temperaturas más altas y bajos coliformes, las taxas Diadociidae, Ceratopogonidae y Limoniidae parecen preferir bajo nitrógeno y las taxas Blephaeridae Y Gerridae muestran preferencia por nitrógeno alto mientras que las taxas Ecnomidae, Ceratopogonidae, Cyclopoidea y Limoniidae parecen preferir bajo nitrogeno y alto Oxígeno disuelto (Figura 6-64)

**Figura 6-64:** Análisis Canónico de Correspondencias entre variables Fisico-Químicas y taxas en zona de Transición a páramo de la microcuenca la Chorrera



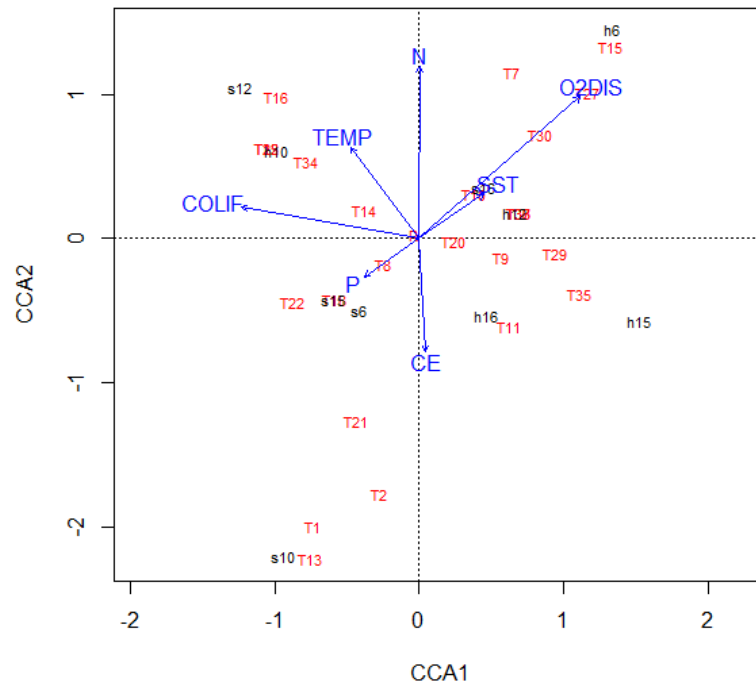
**Figura 6-65:** Análisis Canónico de Correspondencias entre variables hidráulicas y taxas en zona de agricultura de la microcuenca la Chorrera



El diagrama CCA para variables hidraulicas en puntos ubicados en zona de agricultura muestra que la taxa Diadociidae prefiere altas velocidades y bajos caudales, mientras que las taxas Amphipoda, Hydropsychidae, Hydroptilidae y Simuliidae parecen ser sensibles a altos caudales y bajas velocidades, las taxas Oribatida y Corixidae muestran preferencias por profundidades altas (

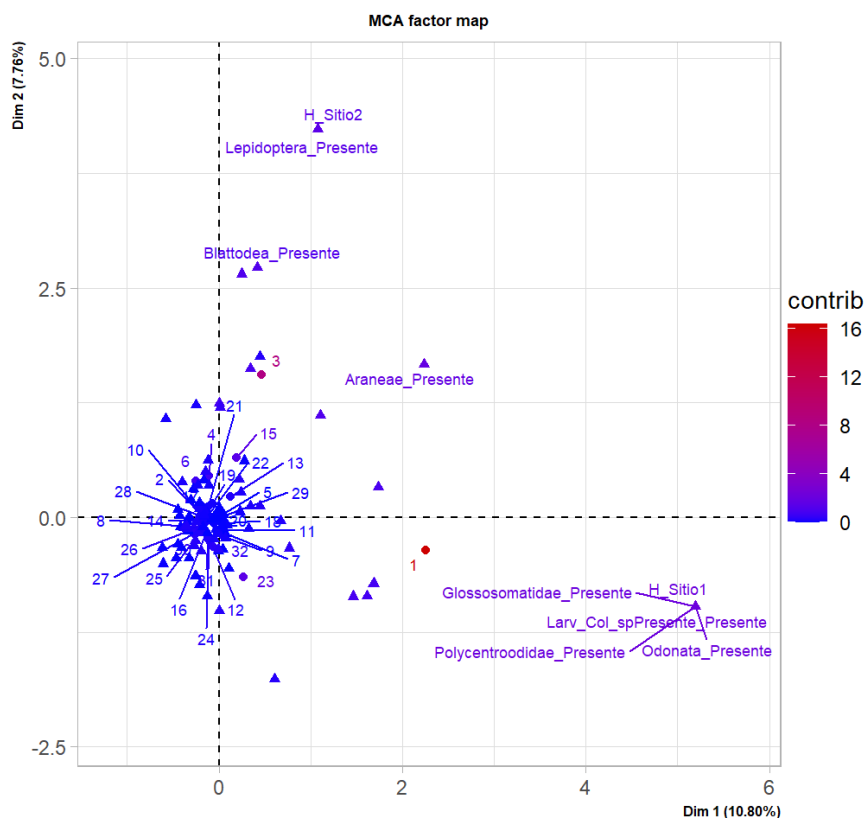
Figura 6-65).

**Figura 6-66:** Análisis Canónico de Correspondencias entre variables Fisico-Quimicas y taxas en zona de agricultura de la microcuenca la Chorrera



zona más alta de la cuenca y es una de la zonas más conservadas. Los resultados indican que se amerita una mayor investigación en relación a las particularidades de habitat de dichos macroinvertebrados.

**Figura 6-67:** Analisis de Correspondencia Multiple



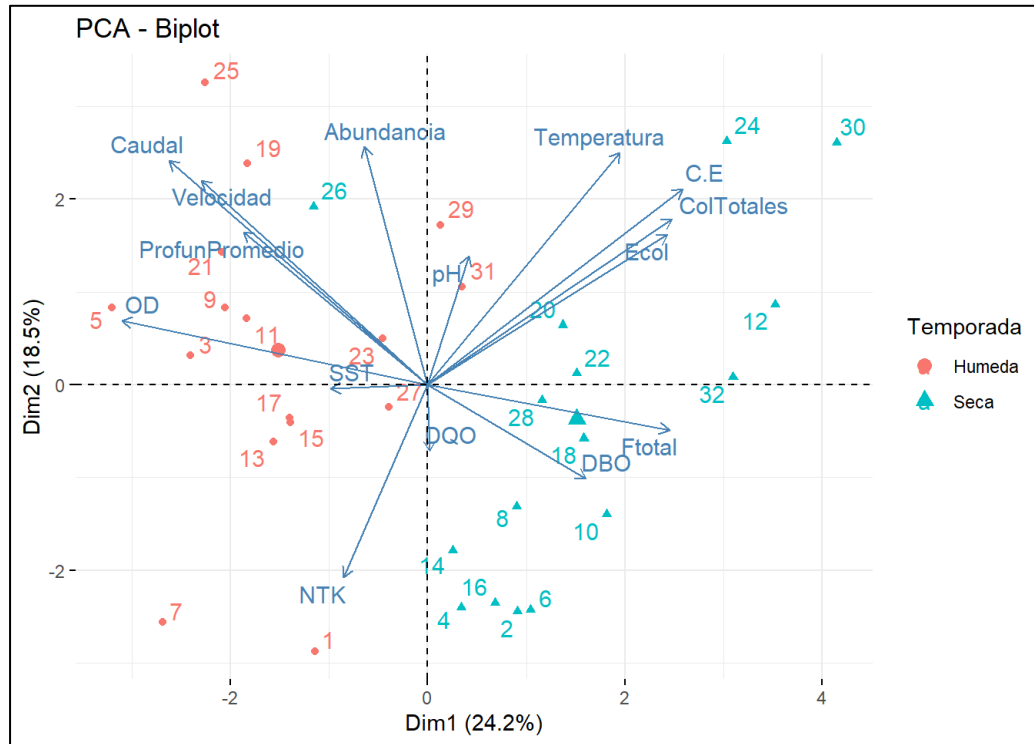
### 6.6.3 Analisis de Componentes Principales

Para realizar el análisis de componentes principales (PCA) los puntos impares representan la época seca y los pares la época húmeda de la misma forma que se hizo para MCA. Según la gráfica del PCA existe una asociación lineal entre las variables Coliformes totales y E.coli; al igual que Caudal, Velocidad y Profundidad. Además se puede apreciar la no asociación lineal entre las variables: Caudal, Velocidad y Profundidad frente a las variables Coliformes totales, E.coli, Conductividad Eléctrica y Temperatura, indicando independencia entre dichos grupos de variables. De otra parte, las variables sólidos suspendidos totales, pH y Demanda Química de Oxígeno (DQO) no estarían bien representadas indicando que están no son bien explicadas por las dos primeras componentes

Ademas se puede visualizar una zonificación de las variables por temporadas, en el primer y cuarto cudrante se encuentran agrupadas la mayoría de las variables correspondientes a la Temporada Seca. En el segundo y tercer cudrate se encuentran agrupadas la mayoría de las variables de la Temporada Húmeda. La temporada seca está asociada a valores altos de Coliformes totales, E. Coli, mayor temperatura del agua y mayor

conductividad eléctrica. Esto debido a que cuando el caudal es bajo la carga orgánica y la concentración de sales aumentan, mientras que la temporada húmeda está asociada con caudales altos, altos contenidos de oxígeno disuelto, mayor velocidad del agua y aumento de la profundidad y la abundancia está asociada a la temporada húmeda.

**Figura 6-68:** Grafica de componentes principales entre taxas y variables físicas, químicas e hidráulicas.



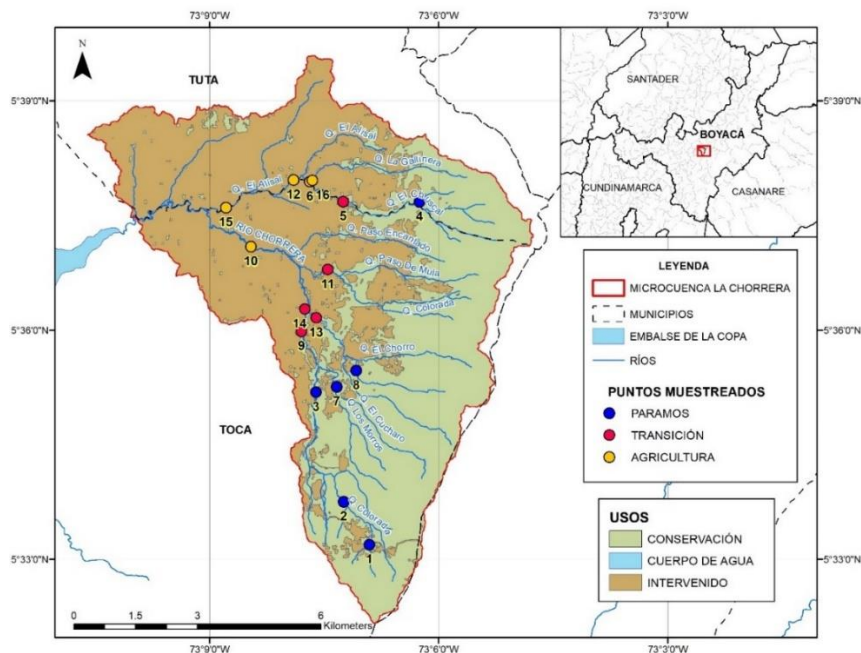
## 6.7 Caudales Ambientales

Usando los resultados del modelo SWAT se realizó la simulación de los caudales en los puntos donde se realizaron los muestreos de aguas y de macroinvertebrados (ANEXO A). Con estos caudales simulados se calcularon los caudales ambientales usando la metodología Hidrológica Q90 (NGPRP) y se agruparon según su ubicación en puntos ubicados en zona de Páramo, puntos en zona de Transición entre páramo y agricultura y puntos ubicados en zona de actividad agropecuaria. Debido a que cada punto drena áreas diferentes los caudales calculados para cada zona se promediaron para proponer un régimen de caudales en función de la zona. Los caudales obtenidos fueron muy bajos por lo que se expresaron en Litros por segundo.

Los puntos fueron analizados según su nivel de conservación como se muestra en la Figura 6-69. Los puntos 1, 2, 3, 4, 7 y 8 se ubicaron en zona de páramo, el área drenada en estos puntos fue de 3.77 Km<sup>2</sup> en promedio con una mínima de 1.13 Km<sup>2</sup> y una máxima

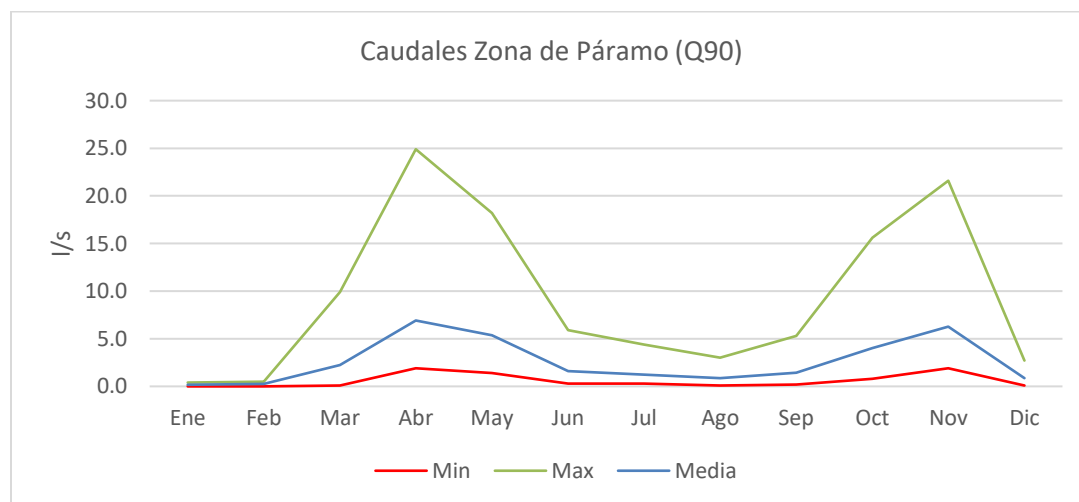
de 8.37 Km<sup>2</sup>. El régimen de caudales ambientales con el método Q90 en los puntos 1 y 4 fueron de cero para algunos meses.

**Figura 6-69:** ubicación puntos según su grado de conservación.



Los caudales promedios calculados para la zona de páramo tienen un régimen bimodal (Figura 6-70) presentando picos en los meses de abril y noviembre con 6.9 L/s y 6.3 L/s respectivamente. Los meses de enero y agosto presentan los caudales más bajos con 0.2 L/s y 0.9 L/s respectivamente (Tabla 6-15), usando la metodología Q90, los caudales del punto 1 disminuyeron hasta cero, lo cual indica la disminución significativa del caudal en época seca.

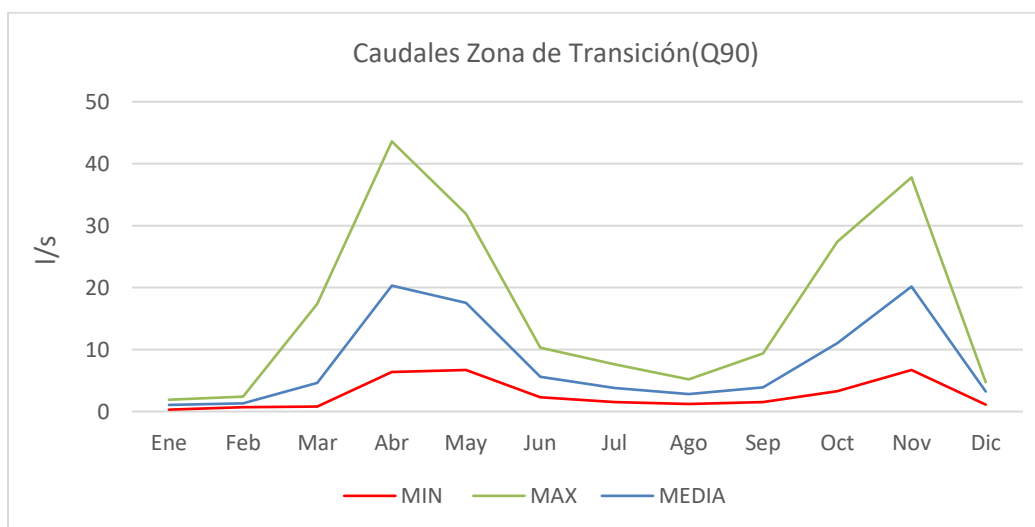
**Figura 6-70:** Caudales ambientales propuestos con la metodología Q90 para zona de páramo.



**Tabla 6-15:** Caudales ambientales propuestos con la metodología Q90 por punto muestreado en zona de páramo.

Punto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0	0	0.3	2.1	1.4	0.3	0.3	0.1	0.2	1.1	1.9	0.1
2	0.1	0.1	0.2	1.9	1.6	0.4	0.3	0.2	0.3	0.8	2	0.2
3	0.1	0.1	0.1	3.7	3.6	0.5	0.3	0.3	0.4	1.7	4	0.2
3	0.2	0.5	9.9	24.9	18.2	5.9	4.4	3	5.3	15.6	21.6	2.7
7	0.2	0.3	0.3	3.7	2.8	0.7	0.6	0.4	0.6	1.5	3.6	0.3
8	0.4	0.5	2.6	5.2	4.6	1.8	1.5	1.2	1.7	3.4	4.6	1.6
Min	0.0	0.0	0.1	1.9	1.4	0.3	0.3	0.1	0.2	0.8	1.9	0.1
Max	0.4	0.5	9.9	24.9	18.2	5.9	4.4	3.0	5.3	15.6	21.6	2.7
Media	0.2	0.3	2.2	6.9	5.4	1.6	1.2	0.9	1.4	4.0	6.3	0.9

Los puntos 5, 9, 11, 13 y 14 se ubicaron en la zona de transición entre páramo y agricultura. El área drenada en estos puntos fue de 11.77 Km<sup>2</sup> con una mínima de 5.74 y una máxima de 23.71 Km<sup>2</sup>. Los caudales ambientales para el punto 11 al igual que para los puntos 1 y 4 fueron de cero para algunos meses (Tabla 6-16). Los caudales promedios propuestos con el método de Q90 para estos puntos muestra un régimen bimodal con picos en los meses de abril y noviembre con 20.32 L/s y 20.16 L/s respectivamente, y los valores más bajos se presentaron en los meses de enero y agosto 1.06 L/s y 2.8 L/s respectivamente (Figura 6-71).

**Figura 6-71:** Caudales ambientales propuestos con la metodología Q90 para zona de transición entre páramo y agricultura.

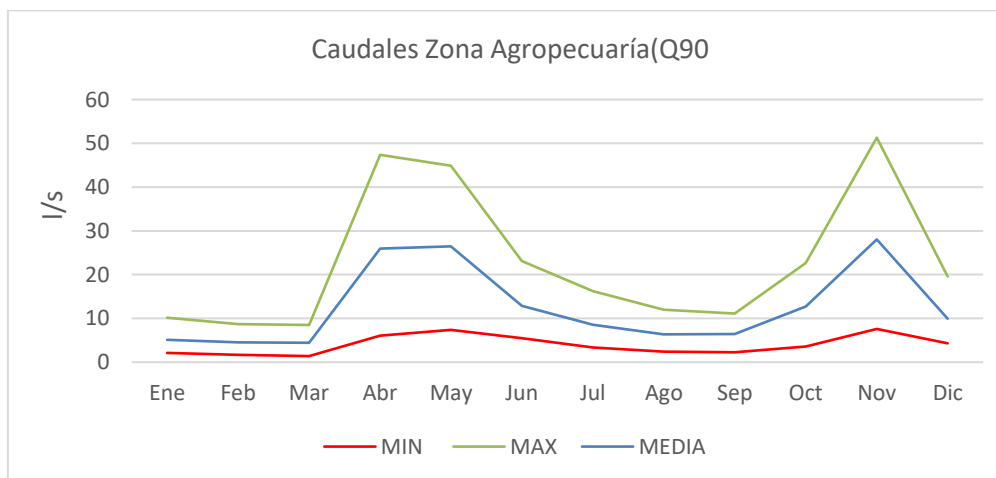


**Tabla 6-16:** Caudales ambientales propuestos con la metodología Q90 por punto muestreado en zona de transición entre páramo y agricultura

Punto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5	1.4	1.2	1	6.4	6.7	3.5	2.2	1.7	1.5	3.3	6.7	2.6
9	0.5	0.7	0.8	11.6	11.2	2.3	1.5	1.2	1.6	5.4	12.5	1.1
11	0.3	0.9	17.4	43.6	31.9	10.3	7.6	5.2	9.4	27.4	37.8	4.7
13	1.2	1.3	1.4	10.8	9.9	4.1	2.7	2	2.3	4.8	11.3	3
14	1.9	2.4	2.6	29.2	28.1	7.9	4.9	3.9	4.7	14.2	32.5	4.7
Min	0.3	0.7	0.8	6.4	6.7	2.3	1.5	1.2	1.5	3.3	6.7	1.1
Max	1.9	2.4	17.4	43.6	31.9	10.3	7.6	5.2	9.4	27.4	37.8	4.7
Media	1.06	1.3	4.64	20.32	17.56	5.62	3.78	2.8	3.9	11.02	20.16	3.22

Los puntos 6, 10, 12, 15 y 16 se ubicaron en zona baja de la cuenca donde se lleva a cabo actividad agropecuaria y el área promedio drenada en estos puntos es de 15.24 Km<sup>2</sup> con una mínima de 3.07 Km<sup>2</sup> y una máxima de 35.75 Km<sup>2</sup>. Los caudales promedios propuestos con el método Q90 para estos puntos presentó un régimen bimodal (Figura 6-72) con picos en los meses de abril, mayo y noviembre con 25.94 L/s, 26.46 L/s y 28.04 L/s respectivamente. Los meses de enero febrero y marzo presentaron los caudales más bajos con 5.1 L/s, 4.56 L/s y 4.44 L/s respectivamente al igual que los meses de julio, agosto y septiembre con 8.58 L/s, 6.38 L/s y 6.4 L/s, respectivamente (

Tabla 6-17).

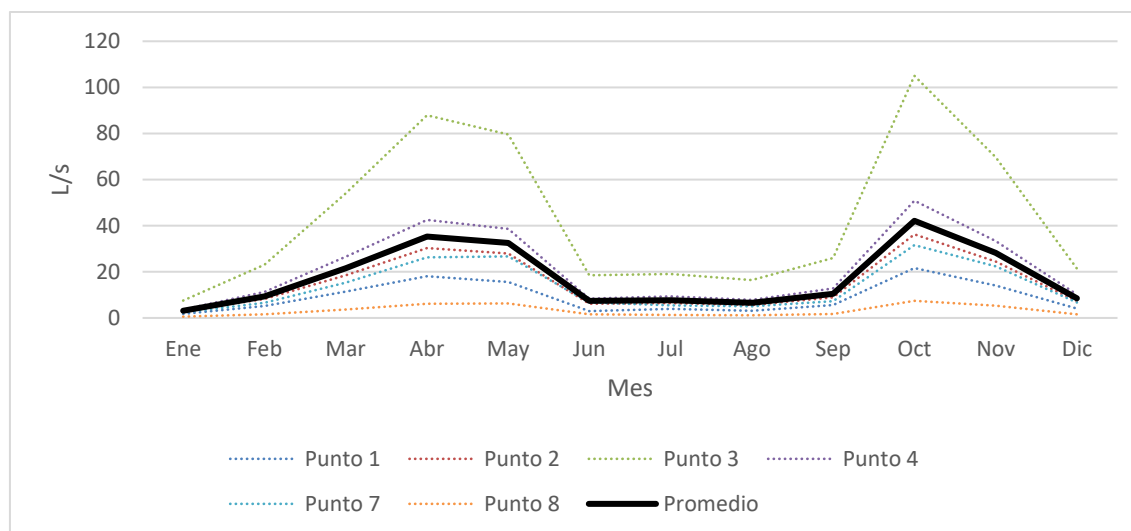
**Figura 6-72:** Caudales ambientales propuestos con la metodología Q90 para zona de agricultura.

**Tabla 6-17:** Caudales ambientales propuestos con la metodología Q90 por punto muestreado en zona de agricultura

Punto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>6</b>	2.1	1.7	1.4	11	11.1	5.7	3.4	2.5	2.3	5	11.2	4.3
<b>10</b>	3.6	4.8	5.7	47.4	44.9	13	9	7.2	8.9	22.7	51.3	8.2
<b>12</b>	7.1	5.7	5	28.8	29.7	16.9	10.7	7.8	7.3	14	29.2	13.2
<b>15</b>	10.2	8.7	8.5	36.4	39.2	23.1	16.2	12	11.1	18.4	40.9	19.6
<b>16</b>	2.5	1.9	1.6	6.1	7.4	5.5	3.6	2.4	2.4	3.6	7.6	4.3
<b>Min</b>	2.1	1.7	1.4	6.1	7.4	5.5	3.4	2.4	2.3	3.6	7.6	4.3
<b>Max</b>	10.2	8.7	8.5	47.4	44.9	23.1	16.2	12	11.1	22.7	51.3	19.6
<b>Media</b>	5.1	4.56	4.44	25.94	26.46	12.84	8.58	6.38	6.4	12.74	28.04	9.92

Lo caudales ambientales determinados por medio de la metodología Q90 para los meses de enero, febrero, agosto y diciembre fueron muy bajos, en especial en zonas de páramo donde llegaron a cero. Esto sumado a la baja regulación hídrica que presenta la cuenca y a que La Cortadera es un páramo seco que presenta precipitación anual promedio de 684 mm hacen que esta metodología no sea la indicada para determinar caudales ambientales en la cuenca con características similares a las observadas en la cuenca La Chorrera. Además, esta metodología no tiene en cuenta los factores biológicos y socioeconómicas para determinar el caudal ambiental, por tal motivo es necesario evaluar metodologías holísticas que integren estos factores. En el presente estudio se tuvo en cuenta la calidad de agua, los servicios ambientales y el comportamiento de las poblaciones de macroinvertebrados en las zonas muestreadas.

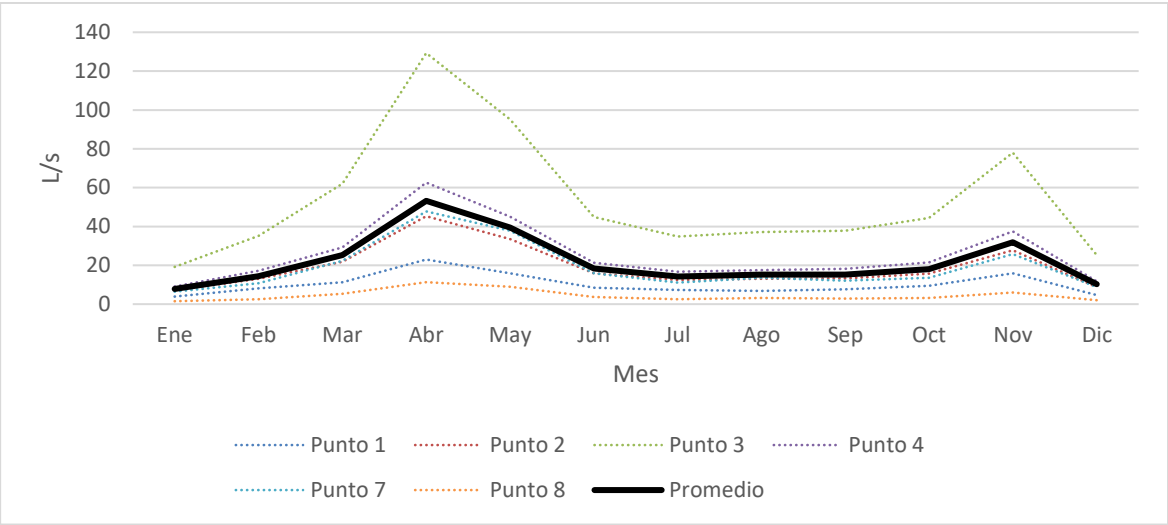
Para determinar los caudales ambientales desde un enfoque holístico se debe tener en cuenta varios factores, pero debido a que en el presente estudio no fue posible obtener toda la información necesaria para esto, se procedió a proponer caudales mínimos recomendados usando las series de caudales modeladas, Las concesiones dadas por Corpoboyacá y la preferencia de las comunidades de macroinvertebrados. La calidad de agua en términos general fue buena y sería necesario modelar esta variable para poder integrarla por lo que no se tuvieron en cuenta para proponer los caudales. Los caudales simulados para los puntos ubicados en zona de páramo muestran para años niño un régimen bimodal (Figura 6-73) con picos en abril, mayo y octubre, y caudales bajos para enero y de junio a septiembre. Cada punto drena un área diferente, pero en promedios los caudales presentaron un mínimo de 3.1 L/s en el mes de enero y un máximo de 42.1 L/s en octubre (Tabla 6-18).

**Figura 6-73:** Régimen de Caudales promedio diarios/mes para fenómeno del niño en zona de Páramo de la Microcuenca la Chorrera.**Tabla 6-18:** Caudales promedio diarios/mes para fenómeno del niño en zona de Páramo de la Microcuenca la Chorrera.

NIÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Punto 1	1.8	5.2	11.5	18.1	15.6	3.0	3.9	3.1	5.6	21.6	14.0	4.1
Punto 2	2.8	8.2	18.5	30.3	27.9	6.2	6.5	5.6	8.9	36.3	24.5	7.2
Punto 3	7.5	23.1	54.0	88	79.6	18.5	19.1	16.4	26.0	105	69.7	21.4
Punto 4	3.6	11.3	26.6	42.5	38.7	8.4	9.4	7.8	12.9	50.9	33.3	10.2
Punto 7	2.4	6.6	15.3	26.3	26.7	6.7	5.5	5.1	7.2	31.6	22.4	6.7
Punto 8	0.6	1.6	3.6	6.2	6.3	1.6	1.3	1.2	1.7	7.4	5.3	1.6
Promedio	3.1	9.3	21.6	35.2	32.5	7.4	7.6	6.5	10.4	42.1	28.2	8.5

Para años neutros en los puntos ubicados en la zona de páramo también se presentó un régimen bimodal (Figura 6-74) con picos en los meses de abril y noviembre y caudales bajos para los meses de enero y de junio a octubre, con un mínimo promedio de 7.8 l/s en el mes de enero y con máximos promedios de 53.2 l/s y 31.8 l/s en el mes de abril y noviembre respectivamente (Tabla 6-19).

**Figura 6-74:** Régimen Caudales promedio diarios/mes para época neutra en zona de Páramo de la Microcuenca la Chorrera.



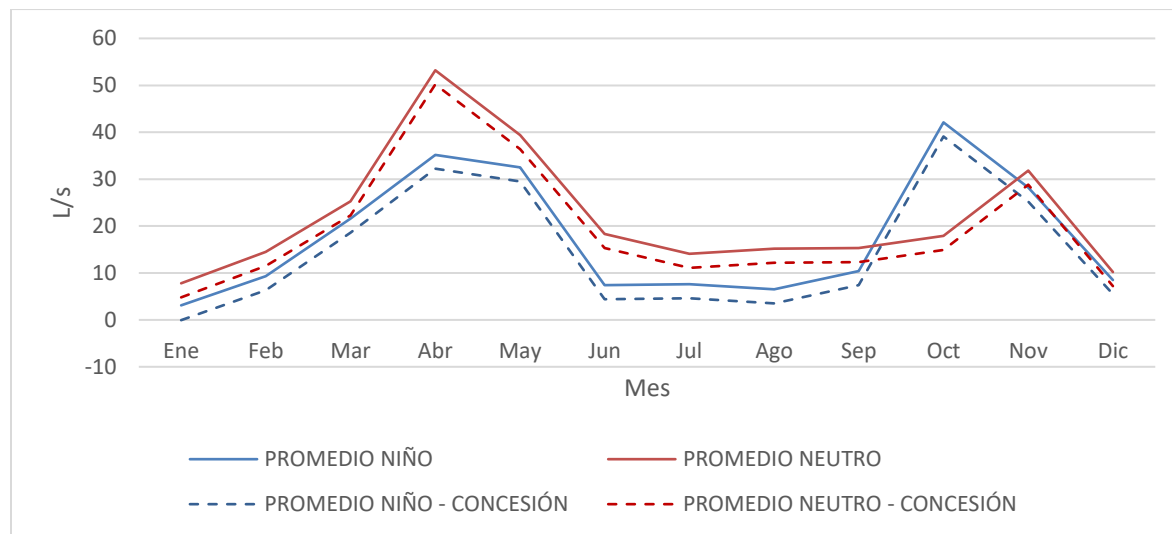
**Tabla 6-19:** Caudales promedio diarios/mes para época neutra en zona de Páramo de la Microcuenca la Chorrera.

NEUTRO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Punto 1	3.9	8.1	11.3	23.0	15.9	8.5	7.3	6.8	7.6	9.4	15.9	4.6
Punto 2	6.9	13.0	21.7	45.3	33.6	15.8	12.4	13.1	13.2	15.6	27.8	8.8
Punto 3	19.2	35.1	62.1	129.3	95.1	44.8	34.7	37.2	37.8	44.4	78.0	25.3
Punto 4	9.1	17.2	29.3	62.6	45.1	21.3	16.7	17.6	18.1	21.5	37.5	11.8
Punto 7	6.4	10.8	22.3	47.8	37.8	15.8	11.0	13.5	12.1	13.6	25.8	8.8
Punto 8	1.5	2.5	5.3	11.3	8.9	3.7	2.6	3.2	2.8	3.2	6.1	2.1
Promedio	7.8	14.5	25.3	53.2	39.4	18.3	14.1	15.2	15.3	17.9	31.8	10.2

Según información solicitada a Corpoboyacá, en la zona de Páramo hay 19 concesiones de agua que en promedio extraen 3 L/s. Al restarle este caudal a los caudales promedios diarios/ mes en época niño y neutral se observa que en fenómeno del Niño para el mes de enero el caudal disminuye 96.7% (0.1 L/s ) y en los meses de junio, julio, agosto y diciembre el caudal disminuye 40.5% (4.4 L/s), 39.4% (4.6 L/s) 46.1% (3.5 L/s) y 35.3% (5.5 L/s) respectivamente. Los meses de febrero a mayo y de septiembre a noviembre Presentaron disminuciones del caudal menores al 28.9%. Para años Neutros los meses de enero y diciembre mostraron las mayores disminuciones de caudal con 38.4% (4.8 L/s) y

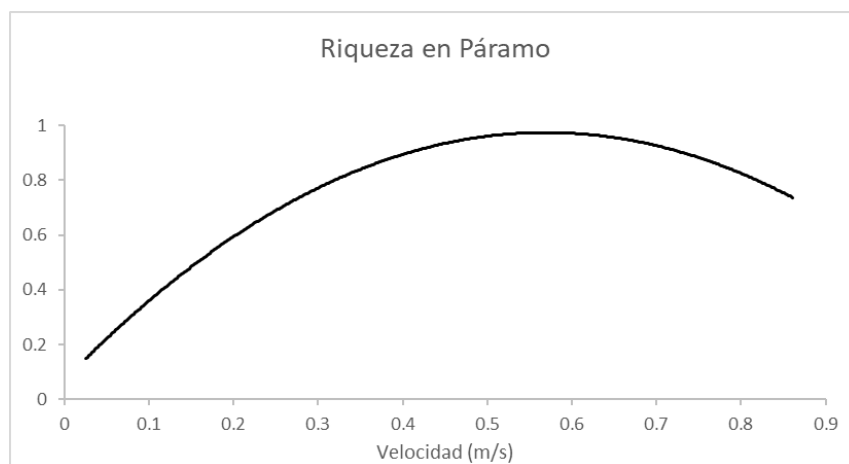
29.4% (7.2 L/s) respectivamente. Los demás meses mostraron disminuciones inferiores al 20.6% (Figura 6-75).

**Figura 6-75:** Caudales concesionados menos caudales promedios en época neutral y niño para zona de páramo.



Teniendo en cuenta que la cuenca presenta, en términos generales, buena calidad de agua y que los caudales extraídos por concesiones no impactan de manera significativa lo caudales naturales, se recomienda que para fenómeno niño en zona de páramo, los caudales no disminuyan de 3.1 L/s en época seca y en época húmeda no estén por debajo de 32.5 l/s. Mientras que para años neutros se recomienda que los caudales no estén por debajo de 7.8 L/s en época seca y de 31.8 l/s para en época húmeda.

**Figura 6-76:** curva de idoneidad de hábitat de Velocidad (m/s) para riqueza de macroinvertebrados en zona de páramo

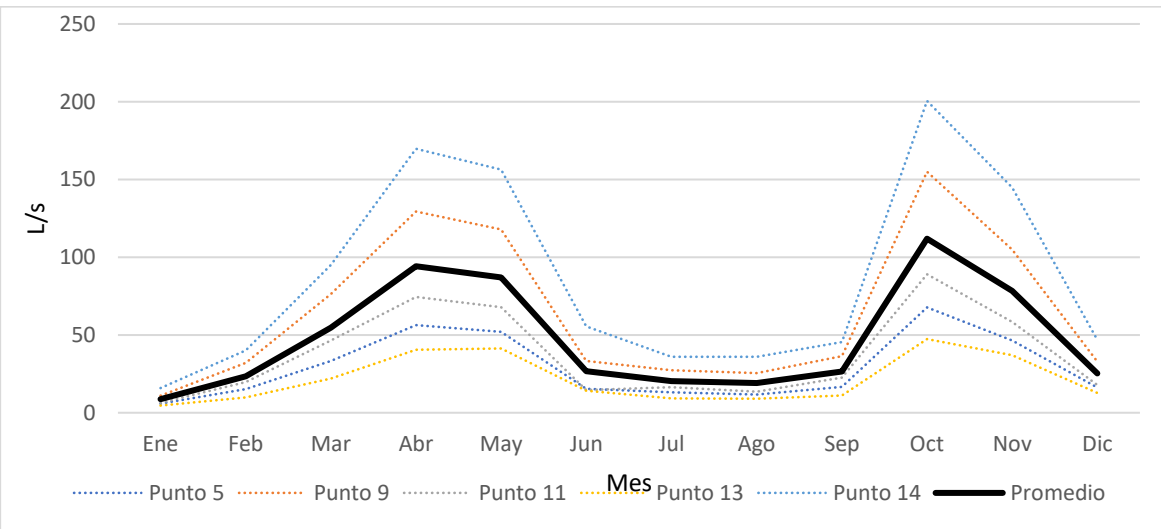


Comparando los promedios de los caudales para años Niño y año normal, se observó que los caudales promedios de años normales fueron superiores a los caudales promedios de

lo los años niño, con excepción del mes de octubre donde los caudales promedios de los años niño, fueron superiores a los caudales promedios para años normales. Enero fue el mes con los caudales promedio más bajos en las dos épocas con 3.1 y 7.8 L/s en años niños y normales respectivamente. Abril fue el mes con caudales promedios más altos para las dos épocas con 35.2 y 53.2 L/s para años niño y años normales.

De las variables hidráulicas medidas, la velocidad mostró una correlación con la riqueza de macroinvertebrados de 0.43, y al graficar la curva de idoneidad de hábitat se observó que hay una mayor Riqueza cuando la velocidad esta entre 0.5 m/s y 0.6 m/s (Figura 6-76), por lo que se recomienda que el caudal mínimo en zona de páramo en la microcuenca La Chorrera tenga una velocidad cercana a la recomendada en la curva de idoneidad de hábitat, pero debido a la vulnerabilidad de los ecosistemas de páramo y a la baja regulación hídrica que presenta la microcuenca, en especial en la zona de páramo, no se recomienda extraer caudales en esta zona ya que podría llegar a afectar negativamente las poblaciones de flora y fauna.

**Figura 6-77:** Régimen de caudales promedio diarios/mes para fenómeno del niño en zona de transición entre Páramo y agricultura en la Microcuenca la Chorrera.



**Tabla 6-20:** Caudales promedio diarios/mes para fenómeno del niño en zona de transición entre Páramo y agricultura en la Microcuenca la Chorrera.

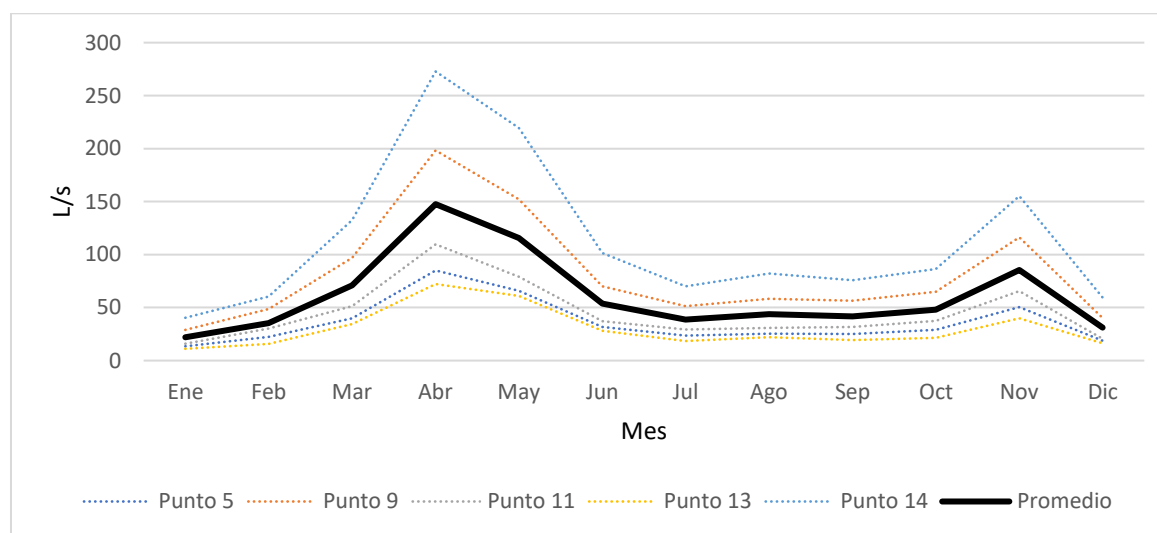
NIÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Punto 5	6	15	33	56	52	15	13	12	17	68	46	16
Punto 9	11	32	76	129	118	33	27	25	36	155	105	33
Punto 11	6	20	47	74	68	15	16	14	23	89	58	18
Punto 13	5	10	22	41	41	14	9	9	11	47	37	13
Punto 14	16	40	95	170	156	56	36	36	46	201	145	47
Promedio	9	23	55	94	87	27	20	19	26	112	78	25

Los caudales simulados para los puntos ubicados en zona de transición entre páramo y

zona de actividad agropecuaria para años niño presentó un régimen bimodal (Figura 6-77) con picos en abril, mayo y octubre, y caudales bajos para enero y de junio a septiembre. Los caudales presentaron en promedio un mínimo de 9 L/s en el mes de enero y un máximo de 112 L/s en octubre (Tabla 6-20).

Para años neutros en los puntos ubicados en la zona de transición entre páramo y zona de actividad agropecuaria, también presentaron un régimen bimodal (Figura 6-78) con picos en los meses de abril, mayo y noviembre y caudales bajos para los meses de enero y de junio a octubre, con un mínimo promedio de 22 L/s en el mes de enero y máximos promedios de 147.6 L/s, 115.6 L/s y 31.8 l/s en el mes de abril, mayo y noviembre respectivamente (Tabla 6-21).

**Figura 6-78:** Régimen de Caudales promedio diarios/mes para época neutra en zona de transición entre Páramo y agricultura en la Microcuenca la Chorrera.



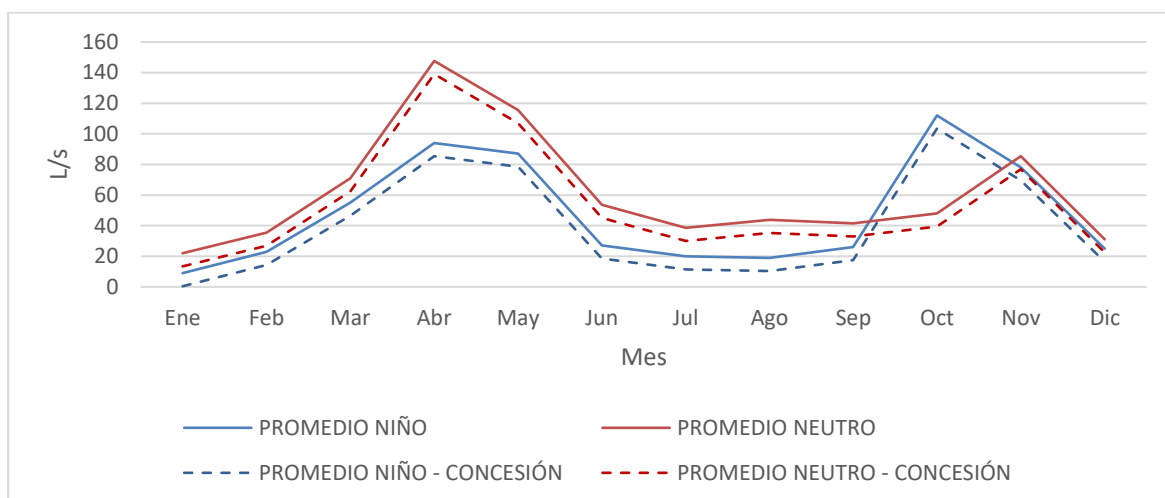
**Tabla 6-21:** Caudales promedio diarios/mes para época neutra en zona de transición entre Páramo y agricultura en la Microcuenca la Chorrera.

Normal	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Punto 5	13.5	22.2	39.8	85.0	66.0	31.8	23.6	25.5	25.0	29.1	50.4	18.6
Punto 9	29.0	48.5	96.9	198.3	152.1	70.1	51.3	58.3	56.4	65.0	116.2	40.3
Punto 11	15.9	30.2	51.3	109.7	79.1	37.3	29.3	30.8	31.7	37.6	65.6	20.6
Punto 13	11.1	15.7	34.4	72.2	61.1	28.0	18.5	22.1	19.4	21.5	39.8	16.3
Punto 14	40.4	60.4	132.4	272.8	219.6	101.4	70.1	82.2	75.7	86.4	155.2	59.4
Promedio	22.0	35.4	71.0	147.6	115.6	53.7	38.6	43.8	41.6	47.9	85.4	31.0

Enero fue el mes con los caudales promedio más bajos en las dos épocas con 8.7 y 22 L/s en años niño y normales respectivamente. Abril presentó los caudales promedios más altos para las dos épocas con 94.1 y 147.6 L/s. Para años niño y años normales respectivamente.

En la zona de transición entre Páramo y zona agropecuaria hay 4 concesiones de agua que en promedio extraen 4.57 L/s, al restarle este caudal a los caudales promedios diarios/mes en fenómeno del Niño para los meses de enero, febrero y diciembre el caudal disminuye 95.2% (0.43 L/s), 32.2% (14.4) y 34.2% (16.4 L/s), y en los meses de junio, julio, agosto y septiembre el caudal disminuye 31.7% (18.4 L/s), 42.8% (11.43L/s) 45.1% (10.4 L/s) y 32.9% (17.4 L/s) respectivamente. Los meses de marzo a mayo, octubre y noviembre presentaron disminuciones del caudal menores al 11%. Para años Neutros los meses de enero y diciembre mostraron la mayor disminución de caudal con 38.9% (13.43 L/s) y 27.6% (22.4 L/s) respectivamente. Los demás meses mostraron disminuciones inferiores al 23% (Figura 6-79).

**Figura 6-79:** Caudales concesionados menos caudales promedios en época neutral y niño para zona de transición entre páramo y agricultura.



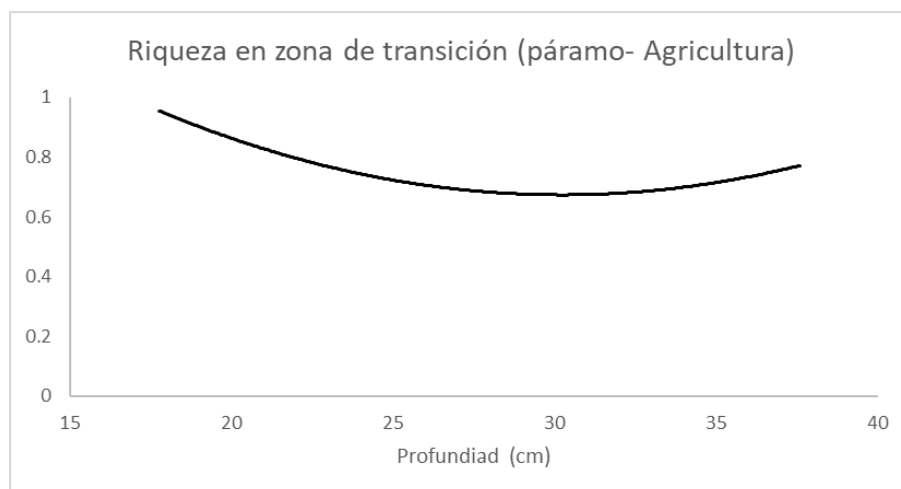
Para fenómeno niño en zona de transición entre páramo y agricultura se recomienda que los caudales no disminuyan de 9 L/s en época seca y en época húmeda no estén por debajo de 87 L/s, mientras que para años neutros se recomienda que los caudales no estén por debajo de 22 L/s en época seca y de 147.6 l/s para en época húmeda.

De las variables hidráulicas medidas la Profundidad mostró una correlación con la riqueza de macroinvertebrados de -0.46, y al graficar la curva de idoneidad de hábitat se observó que la riqueza se ve favorecida con Profundidades entre 15 cm y 40 cm, por lo que se recomienda que el caudal mínimo en zona de transición entre páramo y zonas de actividad Agropecuaria en la microcuenca La Chorrera tenga una profundidad cercana a la recomendada en la curva de idoneidad de hábitat (Figura 6-80).

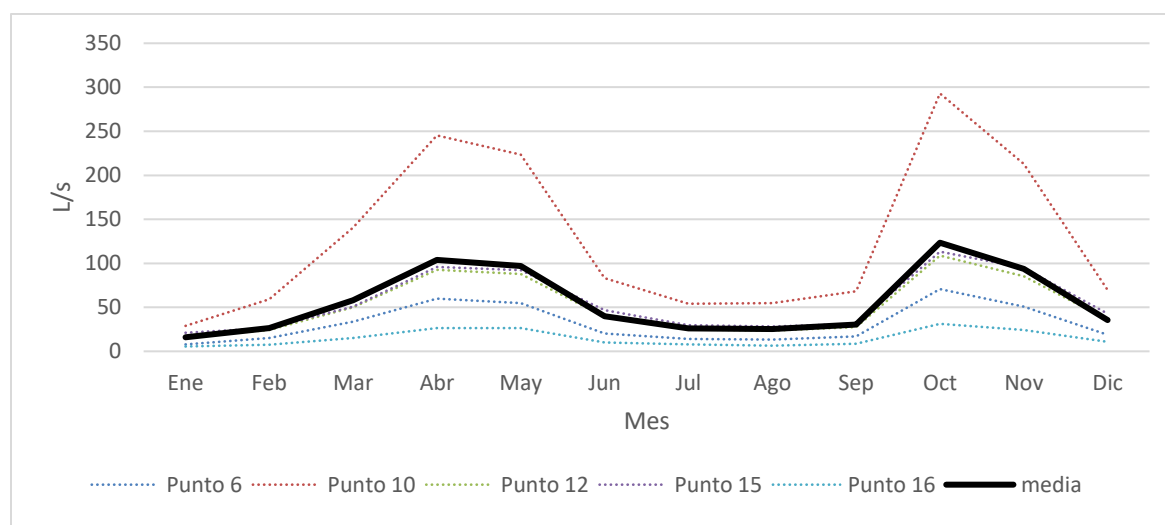
Los caudales simulados en los puntos ubicados en zona de actividad agropecuaria para años niño presentó un régimen bimodal (Figura 6-81) con picos en abril, mayo y octubre, y caudales bajos para enero y de junio a septiembre. Los caudales presentaron en promedio un mínimo de 16 L/s en el mes de enero y un máximo de 140 L/s, 97 L/s y 123 L/s en los meses de abril, mayo y octubre respectivamente (Tabla 6-22).



**Figura 6-80:** curva de idoneidad de hábitat de Profundidad (cm) para riqueza de macroinvertebrados en zona de transición entre páramo y zonas agropecuarias



**Figura 6-81:** Régimen de Caudales promedio diarios/mes para época niño en zona de agricultura en la Microcuenca la Chorrera.



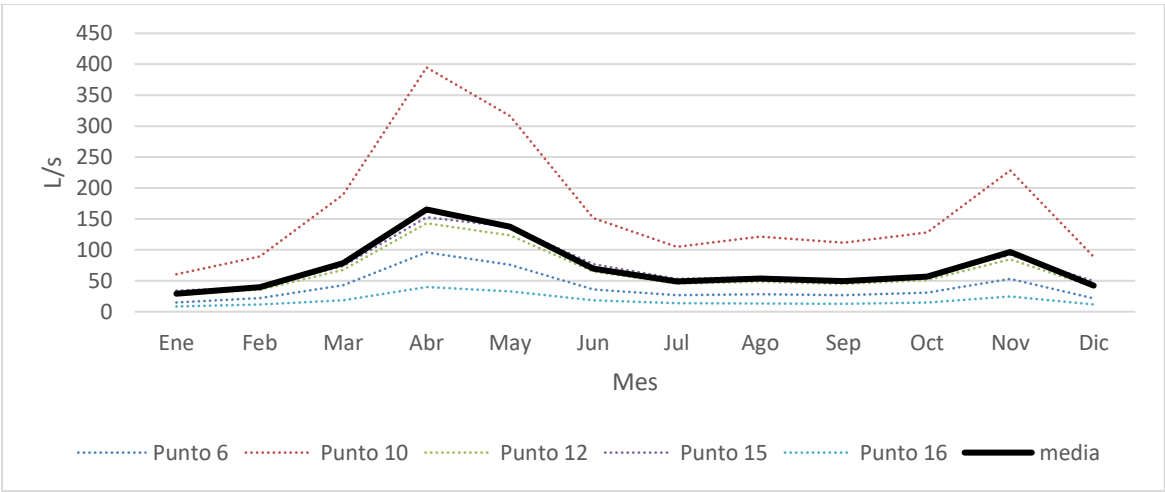
**Tabla 6-22:** Caudales promedio diarios/mes para fenómeno del niño en zona de actividad agropecuaria en la Microcuenca la Chorrera.

NIÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Punto 6	7.8	15.2	33.7	59.9	54.9	20.3	14.1	13.2	16.9	70.7	50.9	18.9
Punto 10	28.9	59.2	140.7	245.3	223.5	83.2	54.2	54.6	68.3	293.0	213.1	69.7
Punto 12	16.5	24.1	50.1	92.5	87.8	39.1	25.0	23.4	27.6	108.8	85.3	35.9
Punto 15	21.1	26.3	50.9	95.7	92.4	46.9	29.5	28.4	31.3	113.3	94.8	42.9
Punto 16	5.5	7.6	15.0	26.4	26.4	10.0	7.9	6.5	8.7	31.2	24.4	10.9
Promedio	16.0	26.5	58.1	104.0	97.0	39.9	26.1	25.2	30.6	123.4	93.7	35.7

Para años normales en los puntos ubicados en la zona de actividad agropecuaria también presentaron un régimen bimodal (Figura 6-82) con picos en los meses de abril, mayo y noviembre y caudales bajos para los meses de enero y de junio a octubre, con un mínimo promedio de 29.1 L/s en el mes de enero y máximos promedios de 165.2 L/s, 137.3 L/s y 96.4 en el mes de abril, mayo y noviembre respectivamente (

Tabla 6-23).

**Figura 6-82:** Régimen de Caudales promedio diarios/mes para época neutra en zona de agricultura en la Microcuenca la Chorrera.

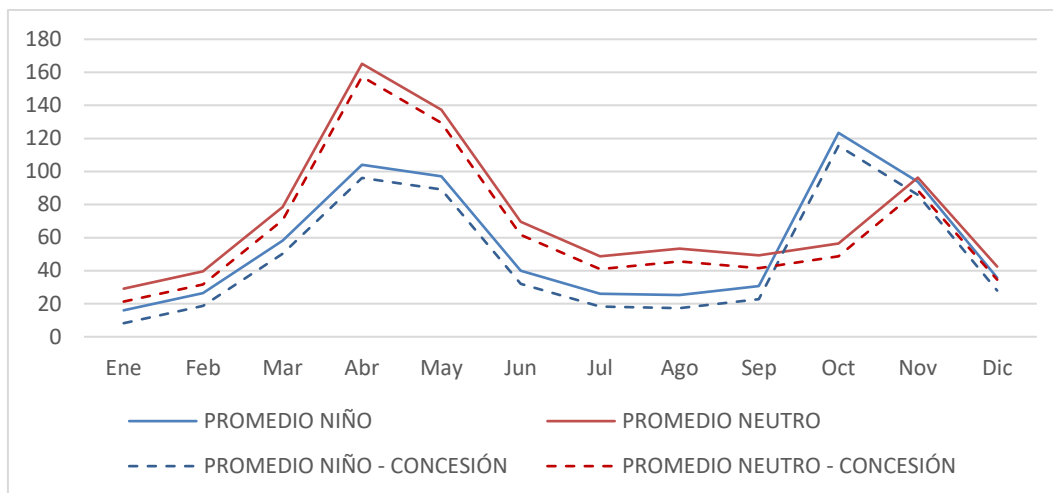


**Tabla 6-23:** Caudales promedio diarios/mes para época neutral en zona de actividad agropecuaria en la Microcuenca la Chorrera.

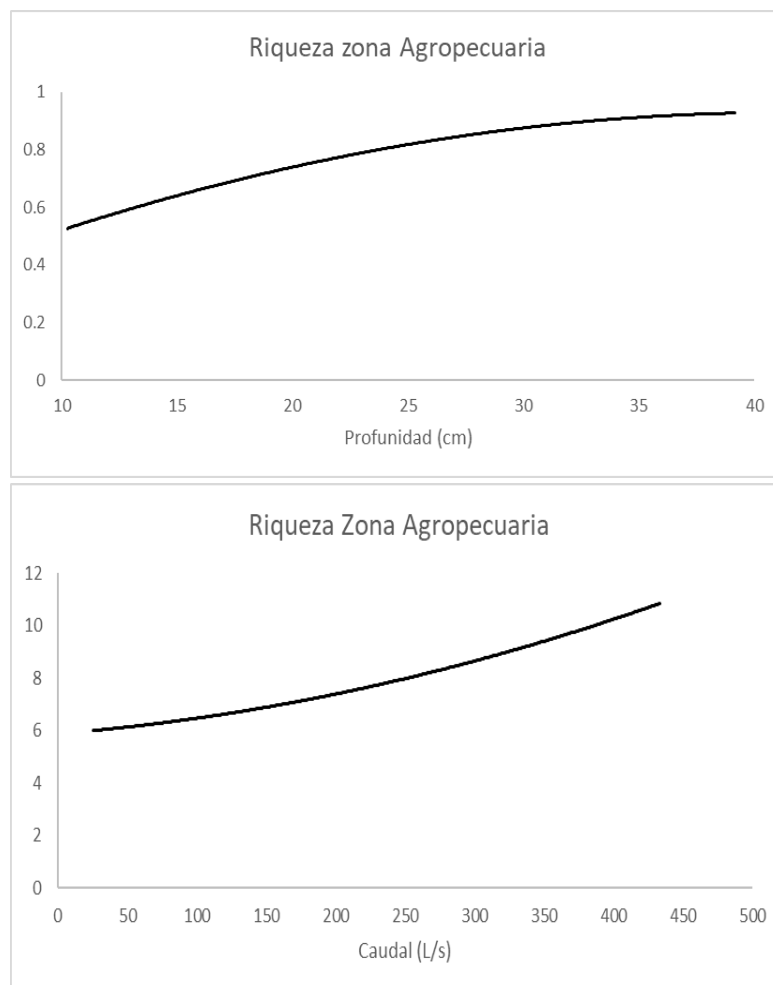
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Punto 6	14.9	21.8	42.9	95.9	75.8	36.0	26.5	28.3	26.7	30.8	53.0	21.7
Punto 10	60.5	89.0	189.3	394.9	316.6	151.6	105.0	121.2	111.4	128.3	228.3	88.7
Punto 12	27.6	35.3	67.8	142.9	123.6	64.9	45.2	48.3	44.5	50.9	84.6	40.4
Punto 15	34.0	39.7	73.7	152.7	137.5	76.9	53.2	56.0	50.9	57.6	91.9	49.6
Punto 16	8.4	11.5	18.5	39.8	32.9	18.4	13.6	13.4	12.9	15.0	24.3	11.4
Promedio	29.1	39.5	78.4	165.2	137.3	69.5	48.7	53.4	49.3	56.5	96.4	42.4

Enero fue el mes con los caudales promedio más bajos en las dos épocas con 8.7 y 22 L/s en años niños y normales respectivamente, abril presentó los caudales promedios más altos para las dos épocas con 94.1 y 147.6 L/s para años niño y años normales respectivamente.

**Figura 6-83:** Caudales concesionados menos caudales promedios en época neutral y niño para zona de Agricultura.



**Figura 6-84:** curvas de idoneidad de hábitat de Profundidad (cm) y caudal (L/s) para riqueza de macroinvertebrados en zona de agricultura.



En la zona de actividad agropecuaria hay 4 concesiones de agua que en promedio extraen 7.8 L/s, al restarle este caudal a los caudales promedios diarios/ mes en fenómeno del Niño para los meses de enero, febrero el caudal disminuye 48.75% (8.2 L/s) y 29.4% (18.7), y en los meses de julio, agosto y septiembre el caudal disminuye 29.8% (18.3 L/s), 30.9% (17.4 L/s) y 25.5% (22.8 L/s) respectivamente, los meses de marzo a junio, octubre y noviembre presentaron disminuciones del caudal menores al 22%. Para años neutros los meses de enero, febrero y diciembre mostraron una disminución del 26.8% (21.3 L/s), 19.7% (31.7) y 18% (34.6 L/s) respectivamente, los demás meses mostraron disminuciones de caudal inferiores al 16% (Figura 6-83).

Para fenómeno niño en zona de actividad agropecuaria se recomienda que los caudales no disminuyan de 104 L/s en época seca y en época húmeda no estén por debajo de 16 L/s, mientras que para años neutros se recomienda que los caudales no estén por debajo de 29.1 L/s en época seca y de 165 L/s para en época húmeda

De las variables hidráulicas medidas la Profundidad y el caudal mostraron una correlación con la riqueza de macroinvertebrados de 0.52 y 0.62 respectivamente. Al graficar la curva de idoneidad de hábitat se observó que la Riqueza se ve favorecida con Profundidades cercanas a los 40 cm y con caudales cercanos a los 450 L/s, por lo que se recomienda que el caudal mínimo en zonas de actividad Agropecuaria en la microcuenca la chorrera tenga una profundidad y caudales cercanos a los recomendados en la curva de idoneidad de hábitat (Figura 6-84).

## 7. Conclusiones

Se analizaron variables hidrológicas, hidráulicas y ecosistémicas usadas en la implementación de metodologías para determinar caudales ambientales en ecosistemas de páramos y alta montaña; En cuanto al análisis hidrológico, y debido a que la mayoría de las cuencas presentes en ecosistemas de páramo y alta montaña de nuestro país no se encuentran aforadas, los modelos hidrológicos son herramientas que bien manejadas pueden ofrecer informaciones confiables para analizar el régimen de caudales, asociados con los eventos de variación climática.

El régimen de caudales observados en la cuenca la chorrera fue bimodal con picos entre los meses de abril y mayo y épocas secas entre los meses de diciembre y enero. Al modelar los caudales usando el programa SWAT se obtuvo un NSE de 0.48, un PBIAS de 4.1. La media y desviación estándar de los valores simulados son muy similares a los observados y los valores bajos se ajustan bastante bien, lo cual indica que la tendencia de los datos modelados respecto los observados fue buena y la modelación fue satisfactoria.

Respecto a los factores bióticos, debido a que los macroinvertebrados tiene poca movilidad, suelen presentar diferentes rangos de tolerancia a condiciones de hábitat y periodos de vida acuáticos que pueden durar meses. Su presencia suele ser un indicador representativo de las condiciones fisicoquímicas, hidrológicas e hidráulicas presentes por largos periodos de tiempo en un ecosistema acuático, además su muestreo, identificación y conteo es relativamente fácil y económico por lo que es uno de los criterios de mayor peso al momento de determinar caudales ambientales.

Para el actual estudio se muestrearon 16 puntos en época seca y en época húmeda donde se clasificaron 16269 macroinvertebrados de los cuales se identificaron 1 Phylum, 1 clase, 3 subclases, 9 Ordenes, 23 Familias y 2 morfoespecies; el 70.51 % de los individuos se lograron clasificar hasta familia, el 23.03% hasta subclase y el 3.06% hasta Orden. Varias de estas taxas presentaron importantes correlaciones entre sus poblaciones y las variables fisicoquímicas, hidráulicas e hidrológicas presentes en la cuenca La Chorrera.

Son varias las características fisicoquímicas del agua que se deben tener en cuenta al momento de determinar el caudal ambiental, y estas deben ir enfocadas a mantener la salud de los ecosistemas hídricos y la oferta de servicios ambientales. Las características fisicoquímicas del agua en un río pueden cambiar en cortos lapsos de tiempo y variar espacialmente. Lo ideal sería hacer más de un muestreo al día, pero esto aumentaría drásticamente los costos de análisis. Si bien existen modelos que pueden simular la calidad de agua en tiempo y espacio esto también requieren de una importante cantidad de información de entrada que para este caso no se contaba. Por tal motivo solo se realizó el muestreo en época seca y húmeda en 16 puntos, donde se tuvieron en cuenta variables que influyeran considerablemente la oferta de servicios ambientales hídrico y/o las condiciones de hábitat de macroinvertebrados, encontrando importantes correlaciones entre la presencia de algunas taxas con características físicas y químicas del agua, y

concluyendo que según las normas colombianas, en términos generales la calidad de agua encontrada en las dos épocas de muestreo fue buena ya que se encuentran dentro de lo recomendado por la norma colombiana. Además, en zona de páramo se encontraron taxas que podrían ser indicadores biológicos de calidad de agua y en zona de agricultura taxas que parecen ser más resistentes a condiciones adversas de calidad de agua.

Los servicios ambientales hídricos más importantes que ofrecen los ecosistemas de páramo y alta montañas suele ser la regulación y retención hídricas. La cuenca La Chorrera es una cuenca madura que presenta en la zona alta ecosistema de páramo seco con suelos poco profundos y materiales parentales duros y fuertes pendientes, lo cual la hace susceptible a presentar crecientes súbitos y presentar baja regulación hídrica por lo que en época seca la demanda hídrica por parte de la comunidad y la presión sobre las comunidades bióticas son mayores. Por tal motivo, en los años con presencia de fenómeno del niño se debe poner particular atención y monitoreo sobre los caudales para disminuir el impacto sobre las comunidades bióticas.

La metodología propuesta por el Ministerio de Medio Ambiente y desarrollo Sostenible (MADS) es muy integrales, pero requiere una importante cantidad de información la cual en muchos casos es complicado obtener. Por tal motivo, en los casos que no se cuente con toda la información recomendada por la metodología del MADS, usar métodos estadísticos multivariados puede ser de gran utilidad, ya que estos permiten analizar la interacción entre variables medidas de una manera profunda y eficiente que para el caso de este estudio permitió proponer una aproximación a los caudales ambientales de la cuenca La Chorrera.

## 8.Recomendaciones

Se recomienda analizar el efecto de la calidad de agua y las variables hidráulicas e hidrológicas sobre las comunidades de perifiton, vegetación ribereña y especies icticas presentes en páramo y alta montaña.

Debido que en el punto 1 se observó una asociación con la presencia de las taxas Glossosomatidae, Larv\_Col\_sp, Polycentrotrochidae, Odonata y Lepidoptera se recomienda profundizar en las necesidades de hábitat de estas taxas con miras a ser usadas como indicadores biológicos.

Se recomienda realizar tanto muestreos de agua como levantamientos batimétricos mas detallados con miras a implementar modelos de calidad de agua para determinar la capacidad de resiliencia de la cuenca.

Debido a la importancia de cuantificar los caudales ambientales al momento de concesionar el recurso hídrico por parte de las autoridades ambientales, es necesario complementar los resultados del presente estudio con un análisis de frecuencia de caudales extremos mínimos usando las metodologías recomendadas en la literatura como por ejemplo la metodología 7Q10.

## 9. Bibliografía

- Acreman, M., & Dunbar, M. J. (2004). *Defining environmental river flow requirements – a review*. 8(5), 861–876.
- Agualimpia, Y. d., & Castro, C. E. (2006). Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos. *Tecnogestion, una mirada ambiental*, 3(1), 3–13.
- Ahmadi-Nedushan, B., St-Hilaire, A., Bérubé, M., Robichaud, É., Thiémonge, N., & Bobée, B. (2006). A review of statistical methods for the evaluation of aquatic habitat suitability for instream flow assessment. *River Research and Applications*, 22(5), 503–523. <https://doi.org/10.1002/rra.918>
- Aparicio, M. F. M. (1992). FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE. En *Area*.
- APROMA. (2000). *Asociación Profesionales del Medio Ambiente. In proceedings: 1° Congreso sobre Caudales Ecológicos. Ponencias y conclusiones*.
- Arthington, A. H., Tharme, R. E., Brizga, S. O., Pusey, B. J., & Kennard, M. J. (2004). Environmental flow assessment with emphasis on holistic methodologies. *Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries Volume II*, II, 37–65. <https://doi.org/10.1002/rra.728>
- Arthington, A. H., & Zalucki, J. M. (1998a). Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques : Review of methods. *LWRRDC Occasional Paper 27/98*, January, 141. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2007.07.067>
- Arthington, A. H., & Zalucki, J. M. (1998b). Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques : Review of methods. En *Land and Water Resources Research and Development Corporation* (Número January). <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.73.808&rep=rep1&type=pdf>
- Barrera, J. (2018). *Estimación de caudal ambiental mediante enfoques ecosistémicos para ña cuenca del rio Nare en el departamento de Antioquia, enmarcada en la metodología ELOHA*. 220. [https://www.researchgate.net/publication/325653875\\_Estimacion\\_del\\_caudal\\_ambiental\\_mediante\\_enfoques\\_ecosistemicos\\_para\\_la\\_cuenca\\_del\\_rio\\_Nare\\_en\\_el\\_Departamento\\_de\\_Antioquia\\_-\\_Colombia\\_enmarcada\\_en\\_la\\_metodologia\\_ELOHA](https://www.researchgate.net/publication/325653875_Estimacion_del_caudal_ambiental_mediante_enfoques_ecosistemicos_para_la_cuenca_del_rio_Nare_en_el_Departamento_de_Antioquia_-_Colombia_enmarcada_en_la_metodologia_ELOHA)
- Bounds, R. I., Lyon, B. W., & Travis, C. D. (1979). *Existing reservoir and stream management recommendations*. FEDERAL AID IN FISHERIES RESTORATION ACT, Federal Aid Project F-30-R-4, Statewide Fishery Management Recommendations. <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/6714/BoundsandLyons1979.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Bovee, K. D. (1982). A Guide to Stream Habitat Analysis Using the Instream Incremental Flow Methodology. *Instream Flow Information Paper. United States Fish and Wildlife*



- Service. FWS/OBS-82/26, 12(82), 1–248.  
<https://www.arlis.org/docs/vol1/Susitna/1/APA193.pdf>
- Braak, C. J. F. (1986). Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 67(5), 1167–1179.  
<https://doi.org/10.2307/1938672>
- Brizga, S. O., Arthington, a H., Choy, S. C., Kennard, M. J., Mackay, S. J., Pusey, B. J., & Werren, G. L. (2002). Benchmarking, a “Top-Down” Methodology for Assessing Environmental Flows in Australian Rivers. *Methodology*, March, 1–35.
- Brown, C., & King, J. (2000). ENVIRONMENTAL FLOW ASSESSMENTS FOR RIVERS - A SUMMARY OF THE DRIFT PROCESS. En *Water Research: Vol. Informatio*.
- Calles, J. (2015). CALIDAD DEL AGUA DE LOS RÍOS EN LOS PÁRAMOS DE TUNGURAHUA USANDO BIOINDICADORES ACUÁTICOS.
- Cantera, K. J. R., Carvajal, E. Y., & Castro, H. L. M. (2009). *Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos*. Universidad del Valle.
- Cardona, W. (2012). *Curvas De Idoneidad De Hábitat Para Macroinvertebrados Bentónicos : Una Herramienta Para La Estimación De Caudales Ambientales*. 78.
- Castro, L. M., Carvajal, Y., & Monsalve, E. A. (2006). ENFOQUES TEÓRICOS PARA DEFINIR EL CAUDAL AMBIENTAL. *Ingeniería y Universidad*, 10(2), 179–195.  
<https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/view/917>
- Chávez, J. A., & González, -Zeas D. (2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. *RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua*, 2(1), 3–13.  
<https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.04.001>
- Chen, H., Zhang, X., Abla, M., Lü, D., Yan, R., Ren, Q., Ren, Z., Yang, Y., Zhao, W., Lin, P., Liu, B., & Yang, X. (2018). Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China. *Catena*, 170(26), 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.006>
- Chiang, S., & Johnson, F. (1976). Low flow criteria for diversions and impoundments. *Water Res Pl-Asce*, 102(2), 227–238.
- Cómbita, J. O. (2013). *Ácaros acuáticos (Acari: Hydrachnidiae) de Colombia*. 141.  
<http://www.bdigital.unal.edu.co/43369/>
- Consuegra, C. S. M. (2013). *Síntesis metodológica para la obtención de caudales ecológicos (Qe), resultados y posibles consecuencias*. ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO, POSGRADOS EN INGENIERÍA CIVIL.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- CORPOBOYACÁ. (2017). ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ALTO CHICAMOCHA – NSS (2403-01). <http://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2017/12/Resumen-ejecutivo-fase-formulacion-pomca-alto-chicamocha.pdf>
- Díez, Juan M. (2005). Bases metodológicas para el establecimiento de caudales

- ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográficas. *Ingeniería y Competitividad*, 7(2), 11–18. <https://www.redalyc.org/html/2913/291323478002/>
- Díez, Juan Manuel, & Sanz, S. O. (2008). DISEÑO ECO-HIDROLÓGICO DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS: EVALUACIÓN. *Energética ISSN*:, 39, 65–76. <https://www.redalyc.org/html/2913/291323478002/>
- Dobson, M. (2013). Family-Level Keys to Freshwater Fly (Diptera) Larvae: A Brief Review and a Key to European Families Avoiding use of Mouthpart Characters. *Freshwater Reviews*, 6(1), 1–32. <https://doi.org/10.1608/frj-6.1.450>
- Dungey, M., Doko Tchatoka, F., & Yanotti, M. B. (2018). Using multiple correspondence analysis for finance: A tool for assessing financial inclusion. *International Review of Financial Analysis*, 59(July), 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2018.08.007>
- Dunham, D. K., & Collotzi, A. . (1975). The transect method of stream habitat inventory-- Guidelines and applications. En *USDA Forest Service*.
- DWAF, D. of W. A. and F. (1999). *WATER RESOURCES PROTECTION POLICY IMPLEMENTATION: RESOURCE DIRECTED MEASURES FOR PROTECTION OF WATER RESOURCES. Volume 2: Integrated Manual, Version 1.0*. <http://www.dwaf.gov.za/Documents/Policies/WRPP/Integrated Manual.htm>
- Dyson, M., Bergkamp, G., & Scanlon, J. (2003). *Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales* (Tr. José M). UICN-ORMA.
- ENDESA. (2011). *Caudales Ecológicos Introducción al Cálculo de Caudales Ecológicos. Un análisis de las tendencias actuales* (p. 184). Empresa Nacional de Electricidad S.A. [http://observatoriaigua.uib.es/repositori/gf\\_caudales\\_calculo.pdf](http://observatoriaigua.uib.es/repositori/gf_caudales_calculo.pdf)
- ESA, E. S. A. (2015). *Sentinel-2 User Handbook* (Número 1).
- Eslamian, S. ., & Eslamian, F. (2016). *Handbook of Drought and Water Scarcity, Environmental Impacts and Analysis of Drought and Water Scarcity* (S. . Eslamian & F. Eslamian (eds.)). CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business. <https://doi.org/10.1201/9781315226774>
- Espinoza., C. V. X. (1999). *Metodología incremental para la asignación de caudales mínimos aconsejables*. IFIM. VI Jornadas del CONAPHI-CHILE.
- Flachier, A. L. (2016). *Análisis de metodologías para el estudio de Caudales Ecológicos. Casos de estudio en ríos altoandinos ecuatorianos* [PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES ESCUELA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Análisis]. [http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/13217/Monografia Caudal Ecologico\\_PUCE\\_ALF%287%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/13217/Monografia Caudal Ecologico_PUCE_ALF%287%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Fraser, J. C. (1978). Suggestions for developing flow recommendations for in-stream uses of New Zealand streams. *Water and Soil Miscellaneous*, 6.
- Fuentes, J. D. J. (2004). ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE CUENCAS: CASO DE ESTUDIO DEL PARQUE NACIONAL PICO DE TANCÍTARO. En *Instituto Nacional de Ecología*. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y

Conservación de Ecosistemas.

[http://www.inecc.gov.mx/descargas/cuencas/morfometria\\_pico\\_tancitaro.pdf](http://www.inecc.gov.mx/descargas/cuencas/morfometria_pico_tancitaro.pdf)

- Gamboa, R. A., Cifuentes, G. R., & Rocha, Z. E. (2015). *Indicadores bacterianos de contaminación fecal en el agua del embalse La Copa, municipio de Toca, Boyacá/Colombia*. 10–23.
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, I., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *7mo Congreso de Medio Ambiente*, 1–25.
- Gómez, A., Robayo, W., & Rondón, J. (2016). CÁLCULO DEL CAUDAL AMBIENTAL MEDIANTE UNA METODOLOGÍA HOLÍSTICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO BOGOTÁ. En *UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA*.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Gopal, B. (2013). Methodologies for the Assessment of Environmental Flows. En Cap-Net (Ed.), *Environmental Flows An Introduction for Water Resources Managers* (National I, pp. 129–182). <http://www.aquaticecosystems.org/wp-content/uploads/2014/02/E-Flow-ch6.pdf>
- Gordon, N. D., McMahon, T. A., & Finlayson, B. L. (2004). *Stream Hydrology An Introduction for Ecologists Second Edition*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester,.
- Gore, J., & Petts, G. (1989). Alternative in Regulated River Management. En P. . James A. Gore & P. D. Geoffrey E. Petts (Eds.), *Alternatives in Regulated River Management*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Guevara, E. T., & Rodríguez, C. E. (2013). *Caudales Ambientales, necesidades de su reconocimiento y lineamientos básicos para su regulación en Costa Rica*. Universidad de Costa Rica, Facultad de Derecho Caudales. <http://ijj.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2017/06/Caudales-ambientales-necesidad-de-su-reconocimiento-y-lineamientos-básicos-para-su-regulación-en-Costa-Rica.pdf>
- Hao, C. F., He, L. M., Niu, C. W., & Jia, Y. W. (2016). A review of environmental flow assessment: Methodologies and application in the Qianhe River. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 39(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/39/1/012067>
- Harrington, R. B., & Dunham, D. K. (1967). A technique for sampling general fish habitat characteristics of streams. En *USDA Forest Service, Paper INT-41*.
- Hirji, R., & Davis, R. (2009). *Environmental Flows in Water Resources Policies, Plans, and Projects*. The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-7940-0>
- Hoppe, R. A. (1975). Minimum streamflows for fish. En *Soils-Hydrology Workshop* (USFS, Mont, pp. 26–30).
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350–361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>

- Hughes, D.A., & Münster, F. (2000). *Hydrological information and techniques to support the determination of the water quantity component of the ecological reserve for rivers*.
- Hughes, Denis A, & Hannart, P. (2003). *A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa*. 270, 167–181.
- IDEAM. (2013). *Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas e Hidrogeológicas de Colombia*. Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM.  
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022655/MEMORIASMAPAZONIFICACIONHIDROGRAFICA.pdf>
- IDEAM, I. de H. M. y E. A., & MADS, M. D. A. Y. D. S. (2017). *Guía Metodológica Para La estimación del Caudal Ambiental* (p. 110). MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico.  
[http://acmineria.com.co/acm/wp-content/uploads/normativas/guia\\_ca\\_version\\_cp.pdf](http://acmineria.com.co/acm/wp-content/uploads/normativas/guia_ca_version_cp.pdf)
- INAP. (2011). *Proyecto Nacional de Adaptación al Cambio Climático*.  
[http://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/PLAN DE ORDENAMIENTO DE CUENCA RIO BLANCO.pdf](http://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/PLAN%20DE%20ORDENAMIENTO%20DE%20CUENCA%20RIO%20BLANCO.pdf)
- Indij, D. (2018). *Diagnóstico del grado de desarrollo del enfoque de caudales ambientales en países de Latinoamérica* (M. Schreider, P. Marta, & R. Erasmo (eds.); IV. Banco, Número July). <https://doi.org/10.18235/0001190>
- Izquierdo, S. M. L., & Madroño, P. S. M. (2014). RÉGIMEN DE CAUDAL ECOLÓGICO, HERRAMIENTA DE GESTIÓN PARA CONSERVAR LA BIOTA ACUÁTICA Ecological Flow Regimen , Management Tool. *UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA - CIENCIA E INGENIERÍA NEOGRANADINA*, 77–94.
- Jayasiri, M. M. J. G. C. N., Dayawansa, N. D. K., & Gunawardena, E. R. N. (2017). Assessment of Environmental Flow Release from DeduruOya Reservoir to Mitigate Possible Impacts on Downstream Ecosystem. *Tropical Agricultural Research*, 28(3), 298–311. <https://doi.org/DOI:> <http://doi.org/10.4038/tar.v28i3.8233>
- Jimenez., J. A., Calvo., P. J., & González., E. (2019). Conceptualización del caudal ambiental en Costa Rica: Determinación inicial para el río Tempisque. Organización para Estudios Tropicales. En *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Número 9). UICN, Área temática de Humedales, Agua y Zonas costeras,.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Jowett, I. G. (1997). Instream Flow Methods : a Comparison of Approaches. *Regulated Rivers: Research & Management*, 13(May 1996), 115–127.  
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199703\)13](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199703)13)
- Karim, K., Gubbels, M. E., & Goulter, I. C. (1995). REVIEW OF DETERMINATION OF INSTREAM FLOW REQUIREMENTS WITH SPECIAL APPLICATION TO AUSTRALIA. *WATER RESOURCES BULLETIN AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION*, 31(6), 1063–1077.

- Karimi, S. S. ., Yasi, U. M., Cox, J. P., & Eslamian, S. (2014). Handbook of Engineering Hydrology: Environmental Hydrology and Water Management. En S. Eslamian (Ed.), *Handbook of Engineering Hydrology: Environmental Hydrology and Water Management* (pp. 85–104). CRC Press Taylor & Francis Group.  
<https://doi.org/10.1201/b16766>
- Kendy, E., Sanderson, J. S., Olden, J. D., Apse, C. D., DePhilip, M. M., Haney, J. a., & Zimmerman, J. K. H. (2009). Applications of the Ecological Limits of Hydrologic Alteration (ELOHA) in the United States. *International Conference on Implementing Environmental Water Allocations*, 10.  
[http://depts.washington.edu/oldenlab/wordpress/wp-content/uploads/2013/03/Kendy-et-al-ELOHA-applications\\_2009.pdf](http://depts.washington.edu/oldenlab/wordpress/wp-content/uploads/2013/03/Kendy-et-al-ELOHA-applications_2009.pdf)
- King, J., & Brown, C. (2006). Environmental flows: Striking the balance between development and resource protection. *Ecology and Society*, 11(2).  
<https://doi.org/10.5751/ES-01682-110226>
- King, J. M., Brown, C. A., Paxton, B. R., & February, R. J. (2004). *DEVELOPMENT OF DRIFT, A SCENARIO-BASED METHODOLOGY FOR ENVIRONMENTAL FLOW ASSESSMENTS Report to the Water Research Commission on project K5/1159 "Development of DRIFT, a second generation methodology for instream flow assessments "* (Número December). Southern Waters Ecological Research and Consulting, University of Cape Town.
- King, & Louw, D. (1998). Instream flow assessments for regulated rivers in south africa using the building block methodology. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 1(2), 109–124. <https://doi.org/10.1080/14634989808656909>
- King, Tharme, R., & Brown, C. (1999). Definition and implementation of instream flows. En *Thematic report to the World Commission on Dams. Southern Waters Ecological Resarch and Consulting, Cape Town, South Africa* (p. 94 p.).
- King, & Tharme, R. E. (1994). Assessment of the instream flow incremental methodology and initial development of alternative instream flow methodologies for South Africa. *WRC Report*, 295, 590. [https://doi.org/WRC Report No. 295/1/94](https://doi.org/WRC%20Report%20No.%20295/1/94)
- Kozak, J. P., Bennett, M. G., Piazza, B. P., & Remo, J. W. F. (2016). Towards dynamic flow regime management for floodplain restoration in the Atchafalaya River Basin, Louisiana. *Environmental Science and Policy*, 64(April 2018), 118–128.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.06.020>
- Linnansaari, T., Monk, W. A., Baird, D. J., & Curry, R. A. (2013). Review of approaches and methods to assess Environmental Flows across Canada and internationally. En *C S A S Canadian Science Advisory Secretariat: Vol. Research D* (National C).  
<http://www.dfo-mpo.gc.ca/library/348885.pdf>
- Loar, J. M., & Sale, M. J. (1981). *ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL ISSUES RELATED TO SMALL-SCALE HYDROELECTRIC DEVELOPMENT. V. INSTREAM FLOW NEE S FOR FISHERY RESOURCES* (OAK RIDGE). ENVIRONMENTAL SCIENCE DIVISION. Prepared for U. S. Department of Energy, Assistant Secretary for Conservation and Renewable Energy, Division of Hydroelectric Resource Development. <https://www1.eere.energy.gov/water/pdfs/doewater-7861.pdf>

- Loar, J. M., Sale, M. J., & Cada, G. F. (1986). Instream Flow Needs to Protect Fishery Resources. *Water Forum '86: World Water Issues in Evolution, Proceedings of ASCE Conference*. <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0049337>
- Lozano, G., Monsalve Durango, E., García Reinoso, P. L., Rodríguez Mejía, C., Gómez Ospina, J. P., & Triviño Loaiza, H. J. (2015). Estimación de Caudales Ecológicos mediante Métodos Hidrológicos e Hidráulicos para la Cuenca del Río Quindío Usando WEAP como Herramienta de Apoyo. *Inge CUC*, 11(2), 34–48. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.11.2.2015.04>
- MADS, M. D. A. Y. D. S. (2002). PÁRAMOS - Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de la Alta Montaña colombiana. En *The Journal of Rural Health*. <https://doi.org/10.1111/j.1748-0361.1995.tb00413.x>
- Manuel, J., & Hernández, D. (2007). Determinación De Caudales Ambientales Confiables En Colombia El Ejemplo Del Río Palacé (Cauca). *Gestión y Ambiente*, 10(1), 153–166.
- MAVDT, M. de M. A. V. y D. T. (2013). *Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren Licencia Ambiental*. AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES. [http://portal.anla.gov.co/documentos/institucional/Metodologia\\_Caudal\\_Ambiental.pdf](http://portal.anla.gov.co/documentos/institucional/Metodologia_Caudal_Ambiental.pdf)
- Mayo, R. M. (2000). *DETERMINACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS MÍNIMOS - ADAPTACIÓN DEL MÉTODO IFIM-PHABSIM Y APLICACIÓN A LOS RÍOS ESPAÑOLES* [UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID]. <http://oa.upm.es/667/1/07200013.pdf>
- Mazvimavi, D., Madamombe, E., & Makurira, H. (2007). Assessment of environmental flow requirements for river basin planning in Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32(15–18), 995–1006. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2007.07.001>
- Meza-S, A. M., Rubio-M, J., G-Dias, L., & M-Walteros, J. (2012). Calidad de agua y composición de macroinvertebrados acuáticos en la subcuenca alta del río chinchiná. *Caldasia*, 34(2), 443–456.
- Milhous, R. T. (2017). Two 1970's methods for prescribing instream flow regimens. *37th Annual AGU Hydrology Days, March, 20-22*, 11. [http://hydrologydays.colostate.edu/Papers\\_2017/Milhous\\_paper.pdf](http://hydrologydays.colostate.edu/Papers_2017/Milhous_paper.pdf)
- Morales, O. F. (2017). EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA IFIM-PHABSIM PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES EN UN TRAMO DE LA SUBCUENCA RÍO NEUSA. En *UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS* (Vol. 6, Número 1). <https://doi.org/10.12962/j23373520.v6i1.22451>
- Motta, Á. J. (2018). *Modelación De Idoneidad De Hábitat De La Comunidad Y Grupos Funcionales De Macroinvertebrados*.
- Murcia, José F. (2010). Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución. En *Ideam* (Número 5). <https://doi.org/10.4067/S0250-71612010000100002>

- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). Ireland's water budget - Model validation and a greenhouse experiment. *Journal Hidrology*, 10(2), 282–290.  
<https://doi.org/10.1080/00750770109555783>
- Nelson, F. A. (1980). Evaluation of selected instream flow methods in Montana. *60th Annual Conference of Western Association of Fish and Wildlife Agencies*, 412–432.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.5962/bhl.title.23323>
- NRC, R. C. N. (2005). An Introduction to Instream Flow Science and Programs. En *The Science of Instream Flows* (pp. 32–57). THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, Committee on Review of Methods for Establishing Instream Flows for Texas Rivers, Water Science and Technology Board, Division on Earth and Life Studies.  
<https://doi.org/10.17226/11197>
- Opperman, J. J., Kendy, E., Tharme, R. E., Warner, A. T., Barrios, E., & Richter, B. D. (2018). A Three-Level Framework for Assessing and Implementing Environmental Flows. *Frontiers in Environmental Science*, 6(August), 76.  
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00076>
- Ormazabal, cesar P. (2004). “CAUDAL ECOLÓGICO, metodologías y casos aplicados, EL CASO DEL PROYECTO RALCO (pp. 1–75).
- Palau., & Alcazár, J. (2010). THE BASIC FLOW METHOD FOR INCORPORATING FLOW VARIABILITY IN. *RIVER RESEARCH AND APPLICATIONS River*, 28, 93–102. <https://doi.org/10.1002/rra>
- Palau., Antoni. (1994). *Los mal llamados caudales “ecológicos”. Bases para una propuesta de cálculo* (28ª, 84ª–9ª ed.). Revista del colegio de Ingenieros de Caminos, Canales, y Puertos.
- Palau. (2003). *Régimen ambiental de caudales: estado del arte. In proceedings: Régimen ambiental de caudales. Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología*. E.U.I.T., Forestal, Universidad Politécnica de Madrid.
- Palau, A., & Alcazar, J. (1996). The Basic Flow: An Alternative Approach to Calculate Minimum Environmental Instream Flows. *Ecohydraulics 2000. Proceedings of the 2nd International Symposium on Habitat Hydraulics*, 2, 547–558.
- Palmer, R. N., & Snyder, R. M. (1985). Effects of Instream Flow Requirements on Water Supply Reliability. *WATER RESOURCES RESEARCH, VOL.*, 21(4), 439–446.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/WR021i004p00439>
- Pantoja, N. (2017). Estimación de caudales ecológicos mediante métodos hidrológicos, hidráulicos y ecológicos en la quebrada El Conejo (Mocoa-Putumayo). *Universidad Pontificia Javeriana*, 1, 119.  
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21157/PantojaValenciaNatalia2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Parra, E. A. (2013). Modelamiento y manejo de las interacciones entre la hidrología, la ecología y la economía en una cuenca hidrográfica para la estimación de caudales ambientales. *Metodología Holística 7 Pasos Calculo Caudal Ecológico*, 127.  
<http://www.bdigital.unal.edu.co/9163/>

- Pinilla, G., Rodríguez, E., & Camacho, L. (2013). La Estimación Del Caudal Ambiental En Proyectos Licenciados Por El Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible ( Mads ), Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 19(1), 43–60. <https://doi.org/dx.doi.org/10.15446/abc.v19n1.38040>.
- Poff, L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B. P., Freeman, M. C., Henriksen, J., Jacobson, R. B., Kennen, J. G., Merritt, D. M., O’Keeffe, J. H., Olden, J. D., Rogers, K., Tharme, R. E., & Warner, A. (2010). The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): A new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55(1), 147–170. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x>
- Poff, N. L. R., Tharme, R. E., & Arthington, A. H. (2017). Evolution of Environmental Flows Assessment Science, Principles, and Methodologies. En *Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management* (Número August, pp. 203–236). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00011-5>
- Redondo, S. A. (2011). *Incertidumbre hidrológica en la estimación de caudales ambientales mediante metodologías basadas en series históricas 2011*. Universidad Nacional de Colombia Facultad, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., & Braun, D. P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4), 1163–1174. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>
- Richter, Brian D., Baumgartner, J. V., Wigington, R., & Braun, D. P. (1997). How much water does a river need ? Discussion : Who does what ? *Freshwater Biology*, 37, 231–249. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x>
- Robinson, E. H. (1969). *A procedure for determining desirable stream flows for fisheries*.
- Rojas-Sandino, L. D., Reinoso-Flórez, G., & Vásquez-Ramos, J. M. (2018). Distribución espacial y temporal de dípteros acuáticos (Insecta: Diptera) en la cuenca del río Alvarado, Tolima, Colombia. *Biota Colombiana*, 19(1), 70–91. <https://doi.org/10.21068/c2018.v19n01a05>
- Roldán, G., & Ramirez, J. (2008). Fundamentos de limnología neotropical. En *Editorial Universidad de Antioquia* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1167/iov.15-17290>
- Rushton, C. D. (2000). *Instream flows in Washington State, past, present and future*.
- Russell, R. L., & Mulvaney, R. J. (1973). Recommending streamflows to meet national forest needs. *Hydrology and the Environment, University of Wyoming*, 32–52.
- Sabaj, V., Rodríguez-Gallego, L., Chreties, C., Crisci, M., Fernández, M., Colombo, N., Lanzilotta, B., Saravia, M., Neme, C., & Conde, D. (2014). *Qué son los Caudales Ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe* (Oficina Re). Programa Hidrológico Internacional (PHI). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000227701>
- Saniruzzaman, Dutti, B. M., Khan, M. F. A., Hazra, S., & Bhadra, T. (2015).



DEVELOPMENT OF ENVIRONMENTAL FLOW ASSESSMENT METHODOLOGY FOR THE SUNDARBANS ECOSYSTEM. *5th International Conference on Water & Flood Management*, 5(March).

<http://www.ourwater.vic.gov.au/environment/rivers/flows/assessment>

- Shi, P., Chen, C., Srinivasan, R., Zhang, X., Cai, T., Fang, X., Qu, S., Chen, X., & Li, Q. (2011). Evaluating the SWAT Model for Hydrological Modeling in the Xixian Watershed and a Comparison with the XAJ Model. *Water Resources Management*, 25(10), 2595–2612. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9828-8>
- Springer, M. (2014). *Trichoptera* (Número August).
- Stalnaker, C. B. (1979). The use of habitat structure preferenda for establishing flow regimes necessary for maintenance of fish habitat. En J. V. WARD & J. A. STANFORD (Eds.), *The Ecology of Regulated Streams* (Plenum Pre, pp. 321–337). <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8613->
- Sundermann, A., Lohse, S., Beck, L. A., & Haase, P. (2007). Key to the larval stages of aquatic true flies (Diptera), based on the operational taxa list for running waters in Germany. *Annales de Limnologie*, 43(1), 61–74. <https://doi.org/10.1051/limn/2007028>
- Surber, E. W. (1937). Rainbow Trout and Bottom Fauna Production in One Mile of Stream. *Transactions of the American Fisheries Society*, 66(1), 193–202. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1936\)66\[193:rtabfp\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1936)66[193:rtabfp]2.0.co;2)
- Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish , Wildlife , Recreation and Related Environmental Resources Cl ose. *Fisheries*, 1:4(July-August), 37–41. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006)
- Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 19(5–6), 397–441. <https://doi.org/10.1002/rra.736>
- Unal, U. N. de C. (2008). *Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyecto licenciados* (Universida, Número 0076). Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial - Dirección de Licencias – OEI 1. <https://doi.org/10.1021/ar4002069>
- USFWS, U. S. F. and W. S. (1981). *INTERIM REGIONAL POLICY FOR NEW ENGLAND STREAMS FLOW RECOMMENDATIONS*. <https://www.fws.gov/newengland/pdfs/Flowpolicy.pdf>
- Wahono, E. P., Legono, D., Istiarto, & Yulistiyanto, B. (2014). Environmental Flow Assessment Using Water-Sediment Approach at the Sekampung River , Indonesia. *Open Journal of Modern Hydrology*, 4(October), 164–172. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4236/ojmh.2014.44016>
- Wang, B., Shao, D. G., Mu, G. L., Wang, Z. M., & Li, X. D. (2016). An eco-functional classification for environmental flow assessment in the Pearl River Basin in Guangdong, China. *Science China Technological Sciences*, 59(2), 265–275. <https://doi.org/10.1007/s11431-015-5926-9>

- WCD, W. C. on D. (2000). DAMS AND DEVELOPMENT A NEW FRAMEWORK FOR DECISION-MAKING, THE REPORT OF THE WORLD COMMISSION ON DAMS. En *Report* (Número November).  
[https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/world\\_commission\\_on\\_dams\\_final\\_report.pdf](https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/world_commission_on_dams_final_report.pdf)
- Wesche, T. A., & Rechar, P. A. (1980). *A Summary of Instream Flow Methods for Fisheries and Related Needs*, . *Eisenhower Consortium Bulletin No. 9*.
- White, R., & Cochnauer, T. (1975). *Stream Resource Maintenance Flow Studies*.  
<https://collaboration.idfg.idaho.gov/FisheriesTechnicalReports/Tec-White1975StreamResourceMaintenanceFlowStudies.pdf>
- WPA, W. P. A. (2017). *Federal Act on the Protection of Waters*.  
<https://www.admin.ch/opc/en/classified-compilation/19910022/201701010000/814.20.pdf>
- WSDE, W. S. D. of E. (2018). *Instream Flow Study Methods used in Washington* (Número January).
- WWDC, W. W. D. C.-H. B. (1985). *LITTLE SNAKE RIVER WATER MANAGEMENT PROJECT FISH CREEK COLLECTOR SYSTEM YIELDS*.  
[http://library.wrds.uwyo.edu/wwdcrept/Fish\\_Creek/Little\\_Snake\\_R-Water\\_Management\\_Project\\_Fish\\_Creek\\_Collector\\_System\\_Yields-Prelm\\_Report-1985.pdf](http://library.wrds.uwyo.edu/wwdcrept/Fish_Creek/Little_Snake_R-Water_Management_Project_Fish_Creek_Collector_System_Yields-Prelm_Report-1985.pdf)
- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K. C., Xia, J., & Yang, H. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358(1–2), 1–23.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.012>
- Zhang, H., Wang, B., Liu, D. L., Zhang, M., Leslie, L. M., & Yu, Q. (2020). Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: A case study of a catchment in tropical Australia. *Journal of Hydrology*, 585(February), 124822. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124822>
- Zhang, W., & Montgomery, D. R. (1994). Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research*, 30(4), 1019–1028. <https://doi.org/10.1029/93WR03553>

## A. Características físico químicas de las unidades cartográficas de suelos

<b>UCS</b>	EC12	<b>Área</b>	
<b>Paisaje</b>	Montaña.		
<b>Clima</b>	Extremadamente frío muy húmedo.		
<b>Relieve</b>	Circo.	<b>Terreno</b>	Ladera.
<b>Material Parental</b>	Depósitos de detritos glaciáricos con influencia de cenizas volcánicas sobre rocas sedimentarias no diferenciadas.		
<b>Características</b>	Suelos superficiales a profundos, de texturas moderadamente finas, bien drenados, muy fuertemente ácidos, saturación de aluminio alta y fertilidad natural baja.		
<b>Taxonomía</b>	Complejo: Afloramientos rocosos; Lithic Haplocryands, familia medial, isofrígida; Typic Humicryepts, familia esquelética-franca, mezclada, activa, sobre fragmental, isofrígida; Aquic Humicryepts, familia franca-fina, mezclada, subactiva, sobre fragmen		
<b>Porcentaje</b>	20, 40, 30, 10		

<b>UCS</b>	EK482	<b>Área</b>	
<b>Paisaje</b>	Montaña.	<b>Clima</b>	Extremadamente frío muy húmedo.
<b>Clima</b>	Extremadamente frío muy húmedo.		
<b>Terreno</b>	Ladera estructural.		
<b>Material Parental</b>	Rocas sedimentarias no diferenciadas con influencia de cenizas volcánicas.		
<b>Características</b>	Suelos bien drenados a excesivamente drenados, textura franca, muy superficiales y superficiales, reacción extremadamente ácida a muy fuertemente ácida, alta saturación de aluminio y fertilidad natural baja		
<b>Taxonomía</b>	Consociación: Andic Humicryepts, familia medial sobre esquelética-franca, mezclada, semiactiva, isofrígida; Lithic Cryorthents, familia isofrígida; Afloramientos rocosos; Lithic Melanocryands, familia medial, isofrígida		
<b>Porcentaje</b>	75, 10, 10, 5		

<b>UCS</b>	HG213	<b>Área</b>	
<b>Paisaje</b>	Montaña.	<b>Clima</b>	Muy frío húmedo y muy húmedo.
<b>Clima</b>	Muy frío húmedo y muy húmedo.		
<b>Relieve</b>	Glacis coluvio-aluvial.		
<b>Terreno</b>	Plano inclinado.		

<b>Material Parental</b>	Depósitos coluvio-aluviales.
<b>Características</b>	Suelos moderadamente profundos, bien drenados, texturas franca, franco arcillosa, arcillosa y arcillo limosa, alto contenido de carbón orgánico, reacción extremada y muy fuertemente ácida, alta saturación de aluminio intercambiable y fertilidad natu
<b>Taxonomía</b>	Consociación: Fluventic Humudepts, familia arcillosa sobre esquelética-franca, mezclada, semiactiva, isomésica; Typic Udorthents, familia fragmental, isomésica; Pachic Humudepts, familia esquelética-franca, mezclada, activa, isomésica
<b>Porcentaje</b>	75, 15, 10

UCS	HK259		Área	
Paisaje	Montaña.	Clima	Muy frío húmedo y muy húmedo.	
Relieve	Crestón.			
Terreno	Resalto.			
Material Parental	Rocas sedimentarias no diferenciadas.			
Características	Suelos moderadamente profundos, bien drenados, textura franco arcillo limosa, reacción extremadamente ácida a muy fuertemente ácida, alta saturación de aluminio y fertilidad muy baja.			
Taxonomía	Consociación: Typic Humudepts, familia franca-fina, mezclada, activa, isomésica; Typic Endoaquerts, familia muy fina, esmectítica, isomésica; Afloramientos rocosos			
Porcentaje	75, 15, 10			

UCS	HK291		Área	
Paisaje	Montaña.	Clima	Muy frío húmedo y muy húmedo.	
Relieve	Crestón.			
Terreno	Ladera estructural.			
Material Parental	Cenizas volcánicas sobre rocas sedimentarias no diferenciadas.			
Características	Suelos superficiales, bien drenados, de textura arcillosa, reacción fuertemente ácida, alta saturación de aluminio intercambiable y fertilidad natural baja.			
Taxonomía	Consociación: Lithic Melanudands, familia medial, isomésica; Typic Humudepts, familia esquelética-franca, mezclada, activa, isomésica.; Typic Melanudands, familia medial sobre fragmental, isomésica; Typic Hapludands, familia medial sobre franca, mez			
Porcentaje	75, 10, 5, 5, 5			

UCS	HK62		Área	
Paisaje	Montaña.	Clima	Muy frío húmedo y muy húmedo.	
Relieve	Crestón.			
Terreno	Escarpe - Ladera erosional.			
Material Parental	Rocas sedimentarias no diferenciadas.			
Características	Suelos poco desarrollados, superficiales, moderadamente profundos y profundos, bien drenados, texturas finas, medias y moderadamente gruesas, muy alta saturación de aluminio y fertilidad natural baja.			

<b>Taxonomía</b>	Complejo: Afloramientos rocosos; Entic Humudepts, familia arcillosa, mezclada, activa, sobre fragmental, isomésica; Fluventic Humudepts, familia franca-fina, muy gravilosa, caolinítica, isomésica; Entic Humudepts, familia franca-fina, mezclada, activ
<b>Porcentaje</b>	50, 30, 15, 5

UCS	HL211			Área	
Paisaje	Montaña.	Clima	Muy frio húmedo y muy húmedo.		
Relieve	Loma.				
Terreno	Ladera.				
Material Parental	Rocas Sedimentarias, ígneo-metamórficas con cenizas volcánicas en sectores.				
Características	Suelos moderadamente profundos; bien drenados; textura arcillosa y franco arcillosa; reacción entre extremadamente ácida y muy fuertemente ácida; alta saturación de aluminio intercambiable y fertilidad natural muy baja.				
Taxonomía	Consociación: Entic Humudepts, familia franca-fina, mezclada, activa, isomésica; Typic Humudepts, familia esquelética-arcillosa, mezclada, activa, isomésica; Typic Humudepts, familia fina, caolinítica, isomésica; Pachic Melanudands, familia cenizal				
Porcentaje	75, 10, 0, 5				

UCS	HL307		Área		
Paisaje	Montaña.	Clima	Muy frio húmedo y muy húmedo.		
Relieve	Loma.				
Terreno	Cima.				
Material Parental	Cenizas volcánicas sobre rocas sedimentarias no diferenciadas.				
Características	Suelos profundos, bien drenados, textura franca y franco arcillo arenosa, reacción muy fuertemente ácida, muy alta saturación de aluminio y fertilidad natural muy baja.				
Taxonomía	Consociación: Typic Melanudands, familia medial sobre esquelética-franca, mezclada, activa, isomésica; Andic Humudepts, familia medial sobre esquelética-franca, mezclada, activa, isomésica				
Porcentaje	90, 10				

UCS	HT180		Área	
Paisaje	Montaña.	Clima	Muy frio húmedo y muy húmedo.	
Relieve	Terraza fluvio glaciar.			
Terreno	Plano.			
Material Parental	Cenizas volcánicas sobre depósitos de detritos glaciáricos.			
Características	Suelos profundos, bien drenados, textura franco arcillo arenosa y arcillosa, reacción fuertemente acida, muy alta saturación de aluminio y fertilidad alta.			
Taxonomía	Typic Hapludands, familia medial sobre esquelética-franca, mezclada, activa, isomésica; Typic Melanudands, familia medial sobre arcillosa,			

	caolínica, isomésica
<b>Porcentaje</b>	75, 25

UCS	HV86		Área	
Paisaje	Montaña.	Clima	Muy frio húmedo y muy húmedo.	
Relieve	Vallecito.			
Terreno	Vega.			
Material Parental	Depósitos coluvio-aluviales.			
Características	Suelos son moderadamente profundos, pobres e imperfectamente drenados, texturas medias, afectados por el aluminio de cambio y fertilidad natural baja.			
Taxonomía	Complejo: Aquíc Humudepts, familia franca-gruesa sobre arenosa, mezclada, activa, isomésica; Entic Humudepts, familia esquelética-franca, mezclada, activa, isomésica; Acrudoxic Melanudands, familia medial, isomésica			
Porcentaje	40, 40, 20			

UCS	EK37			Área	
Paisaje	Montaña.	Clima	Extremadamente frio muy húmedo.		
Relieve	Crestón.				
Terreno	Escarpe - Ladera erosional.				
Material Parental	Rocas sedimentarias no diferenciadas (Duras).				
Características	Suelos muy superficiales; excesivamente drenados; de textura franco arenosa; reacción fuertemente ácida; saturación de aluminio intercambiable sin limitaciones para las plantas y fertilidad natural baja.				
Taxonomía	Complejo: Afloramientos rocosos; Lithic Cryorthents, familia isofrígida				
Porcentaje	55, 45				

UCS	HK101a		Área	
Paisaje	Montaña.	Clima	Muy frio húmedo y muy húmedo.	
Relieve	Crestón.			
Terreno	Escarpe.			
Material Parental	Rocas sedimentarias no diferenciadas.			
Características	Suelos superficiales, bien drenados, textura franco arenosa, reacción muy fuertemente ácida, alta saturación de aluminio intercambiable y fertilidad natural baja.			
Taxonomía	Consociación: Afloramientos rocosos; Lithic Udorthents, familia arcillosa, caolínica, isomésica; Entic Humudepts, familia franca, mezclada, activa, isomésica, superficial; Fluventic Humudepts, familia franca-fina muy gravillosa, caolínica, isom			
Porcentaje	60, 20, 10, 5, 5			

UCS	HK101B		Área	
Paisaje	Montaña.	Clima	Muy frío húmedo y muy húmedo.	
Relieve	Crestón.			

<b>Terreno</b>	Escarpe.
<b>Material Parental</b>	Rocas sedimentarias no diferenciadas.
<b>Características</b>	Suelos superficiales, bien drenados, textura franco arenosa, reacción muy fuertemente ácida, alta saturación de aluminio intercambiable y fertilidad natural baja.
<b>Taxonomía</b>	Consociación: Afloramientos rocosos; Lithic Udorthents, familia arcillosa, caolínica, isomésica; Entic Humudepts, familia franca, mezclada, activa, isomésica, superficial; Fluventic Humudepts, familia franca-fina muy gravillosa, caolínica, isom
<b>Porcentaje</b>	60, 20, 10, 5, 5

<b>UCS</b>	<b>MMA</b>	<b>Área</b>	
<b>Paisaje</b>	Montañas Estructurales Erosionales	<b>Clima</b>	Frío, seco
<b>Relieve</b>	Vigas y Crestones Homoclinales		
<b>Terreno</b>			
<b>Material Parental</b>	Rocas sedimentarias clásticas mixtas y localmente rocas ígneas		
<b>Características</b>	Relieve moderado a fuertemente escarpado, con pendientes superiores al 12 a 75%, localmente mayores, afectados por escurrimiento difuso en grado ligero y pedregosidad superficial; suelos moderadamente profundos a superficiales, bien drenados, de texturas medias, reacción muy fuertemente ácida, saturación de aluminio mayor del 75% y fertilidad muy baja.		
<b>Taxonomía</b>	Asociación: Inceptic Haplustalfs, Lithic Ustorthents, Typic Dystrustepts		
<b>Porcentaje</b>	30, 30, 25		

<b>UCS</b>	<b>ME</b>		
<b>Paisaje</b>			
<b>Clima</b>			
<b>Relieve</b>			
<b>Terreno</b>			
<b>Material Parental</b>			
<b>Características</b>	Relieve fuertemente ondulado y quebrado hasta escarpado, con pendientes superiores al 25%, afectados por escurrimiento difuso y concentrado en grado moderado a muy severo (bad-lands) con alta presencia de material ferralítico, cascajo y gravilla, aflora el material parental; en las inclusiones existen suelos muy superficiales, excesivamente drenados, reacción extremadamente ácida y fertilidad baja.		
<b>Taxonomía</b>	Consociación : Miscelaneo erosionado		
<b>Porcentaje</b>	100		

<b>UCS</b>	<b>AMV</b>	<b>Área</b>	
<b>Paisaje</b>	Altiplanicie Estructural	<b>Clima</b>	Frío, seco
<b>Relieve</b>	Lomas y Glacis		

<b>Terreno</b>	
<b>Material Parental</b>	Depósitos superficiales piroclásticos de ceniza volcánica sobre rocas sedimentarias clásticas mixtas
<b>Características</b>	Relieve moderado a fuertemente quebrado y moderadamente empinada y escarpada, con pendientes 12-25%, 25-50% y 50-75%, afectados por escurrimiento difuso en grado ligero y moderado; suelos profundos y muy profundos, bien drenados, de texturas franco finas, reacción muy fuerte y fuertemente ácida, saturación de aluminio mayor del 70% y fertilidad baja.
<b>Taxonomía</b>	Asociación: Vertic Haplustalfs, Andic Dystrustepts
<b>Porcentaje</b>	45, 35

<b>UCS</b>	MHV	<b>Área</b>	
<b>Paisaje</b>	Montañas Estructurales Erosionales	<b>Clima</b>	Muy frío, húmedo
<b>Relieve</b>	Vigas, Lomas y Glacis		
<b>Terreno</b>			
<b>Material Parental</b>	Depósitos superficiales de ceniza volcánica sobre rocas sedimentarias clásticas mixtas		
<b>Características</b>	Relieve moderado a fuertemente quebrado y moderadamente escarpado, con pendientes 12-25%, 25-50% y 50-75%, hay evidencia de movimientos en masa (pata de vaca) afectados en sectores por fragmentos de roca en superficie; suelos muy superficiales por saturación de aluminio mayor del 70%, bien drenados, texturas medias, reacción muy fuertemente ácida, y fertilidad baja.		
<b>Taxonomía</b>	Asociación Typic Hapludands, Humic Pachic Dystrudepts, Typic Dystrudepts		
<b>Porcentaje</b>	50, 20, 20		

<b>UCS</b>	AMH	<b>Área</b>	
<b>Paisaje</b>	Montañas Estructurales Erosionales	<b>Clima</b>	Frío, seco
<b>Relieve</b>	Vallecitos		
<b>Terreno</b>			
<b>Material Parental</b>	Depósitos superficiales, clásticos mixtos		
<b>Características</b>	Relieve plano con pendientes 0-1%; suelos muy superficiales limitados por nivel freático alto, pobremente drenados, de reacción química muy fuertemente ácida, saturación de bases moderada a alta y fertilidad natural moderada.		
<b>Taxonomía</b>	Consociación: Fluventic Haplustolls		
<b>Porcentaje</b>	80		

<b>UCS</b>	MME	<b>Área</b>	
<b>Paisaje</b>	Montañas Estructurales Erosionales	<b>Clima</b>	Frío, seco
<b>Relieve</b>	Crestas Homoclinales Abruptas		
<b>Terreno</b>			
<b>Material Parental</b>	Rocas sedimentarias clásticas arenosas con intercalaciones de limoarcillosas		

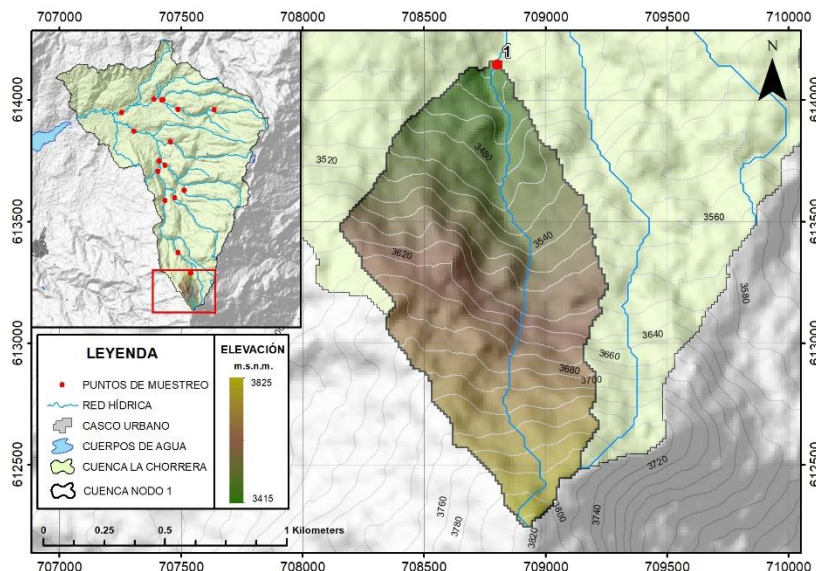


<b>Características</b>	Relieve moderado a fuertemente quebrado y moderadamente escarpado, pendientes predominantes de 25 a 75%; afectados por movimientos en masa, pata de vaca, erosión hídrica, ligera a moderada, los suelos son superficiales a moderadamente profundos, bien drenados, de texturas medias sobre finas, reacción muy fuertemente ácida, saturación de bases y fertilidad moderada a alta.
<b>Taxonomía</b>	Complejo: Lithic Ustorthents, Humic Dystrustepts, Afloramientos rocosos
<b>Porcentaje</b>	40, 30, 20

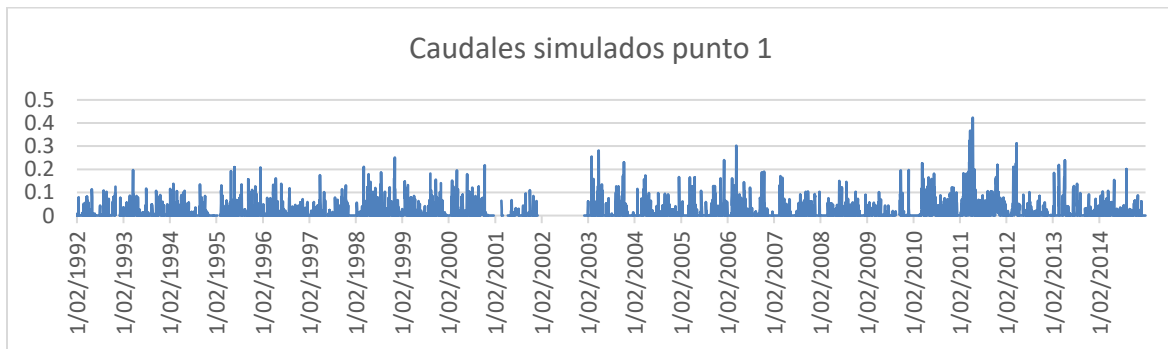
<b>UCS</b>	<b>MMX</b>	<b>Área</b>	
<b>Paisaje</b>	Montañas Estructurales Erosionales	<b>Clima</b>	Frío, seco
<b>Relieve</b>	Cuestas, Lomas, Glacis		
<b>Terreno</b>			
<b>Material Parental</b>	Rocas sedimentarias clásticas arenosas con intercalaciones de limoarcillosas con capas discontinuas de ceniza volcánica		
<b>Características</b>	Relieve ligera a fuertemente quebrado, con pendientes 7-12%, 12-25% y 25-50%; afectados por movimientos en masa, (solifluxión) terracetos, reptación y erosión hídrica en grado ligero; suelos superficiales, limitados por contenidos tóxicos de aluminio, bien drenados, pH muy fuerte a fuertemente ácido y fertilidad baja a alta.		
<b>Taxonomía</b>	Asociación Humic Dystrustepts, Typic Haplustalfs, Typic Haplustands		
<b>Porcentaje</b>	40, 30, 20		

## B. Anexo: Variables medidas en los puntos muestreados

### PUNTO 1

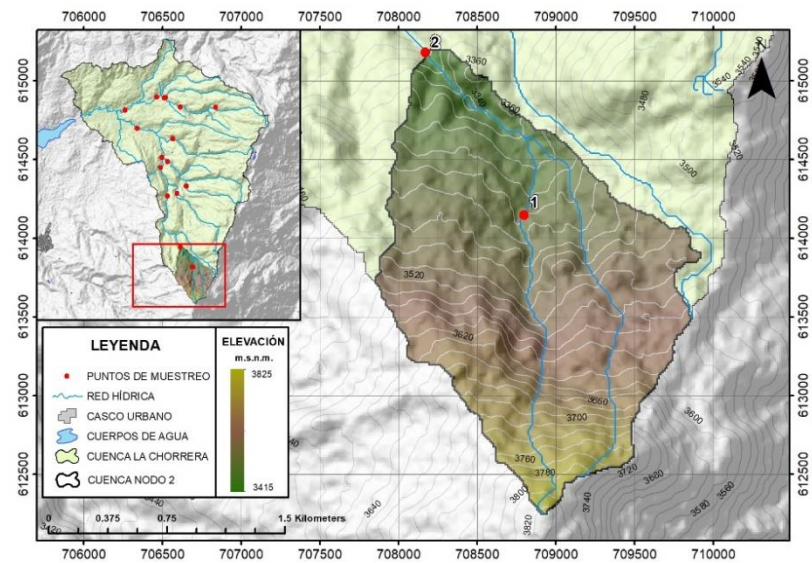


PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O <sub>2</sub>	DQO mg/L O <sub>2</sub>	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m <sup>3</sup> /S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP C°
1	<i>Humeda</i>	6	9	5	17.4	0.01	17	6.8	0.34	0.07	7.71	0.68	5.9	6.1	9.6
	<i>Seca</i>	9	22	13	0.29	0.42	11	2	0.19	0.06		0.43	7	9.53	9.83

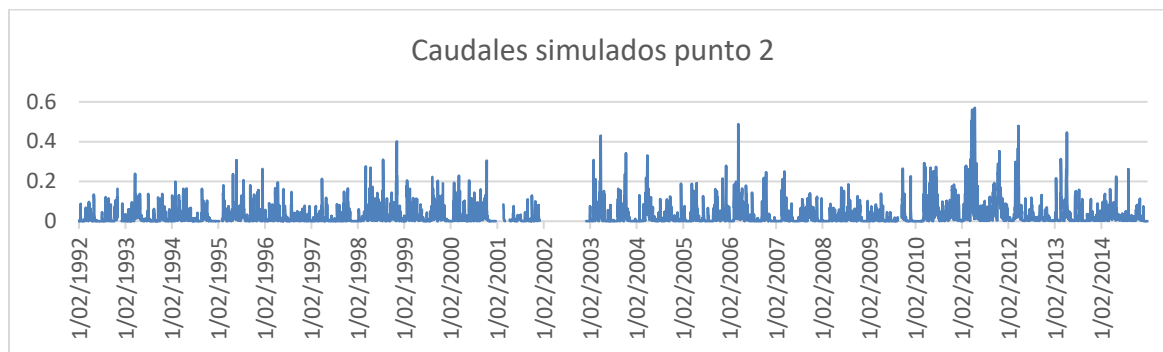


Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
1	Lluvia	Oribatida	Orden	Oribatida	10
		Acariformes	Subclase	Acari	5
		Diptera	Familia	Chironomidae	64
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	17
		Collembola	Familia	Entomobryidae	9
		Himenoptera	Familia	Formicidae	14
		Coleoptera	Familia	Elmidae	10
		Amphipoda	Orden	Amphipoda	4
		Coleoptera	Morfoespecie	Larv_Col_sp1	1
		Odonata	Orden	Odonata	2
		Diptera	Familia	Simuliidae	110
		Araneae	Orden	Araneae	4
		Tricoptera	Familia	Glossosomatidae	1
		Tricoptera	Familia	Polycetodontidae	3
		Tricoptera	Familia	Hydropsychidae	3
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	6
		Hemiptera	Familia	Corixidae	4
		Hemiptera	Familia	Gerridae	3
		Tysanoptera	Orden	Thysanoptera	1
	Seca	Diptera	Familia	Chironomidae	180
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	16
		Amphipoda	Orden	Amphipoda	20
		Sphaeriida	Familia	Sphaeriidae	28
		Diptera	Familia	Limoniidae	8
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	20

## PUNTO 2

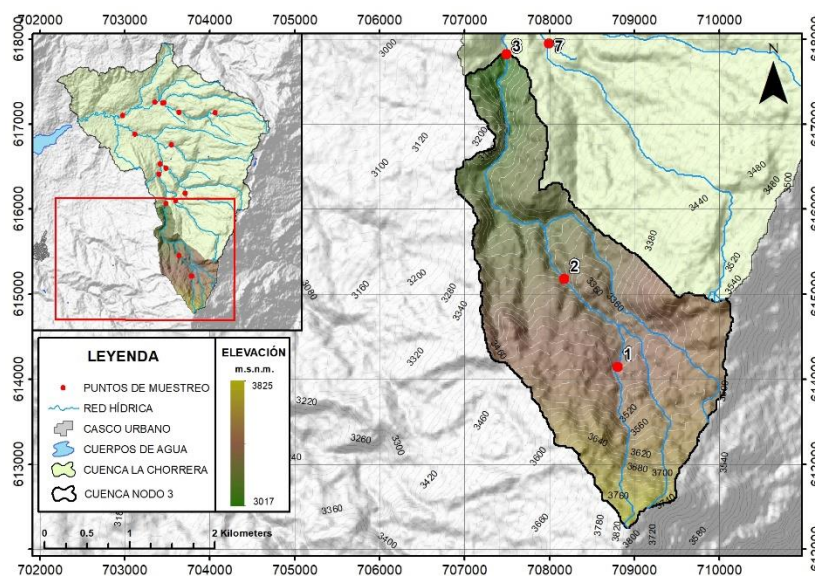


PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O <sub>2</sub>	DQO mg/L O <sub>2</sub>	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m <sup>3</sup> /S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP C°
2	Humeda	3.00	11.00	0.49	11.20	0.01	1.79	1.79	0.64	0.19	7.42	0.66	6.97	9.47	9.93
	Seca	5.00	24.00	12.00	12.04	0.16	17.00	13.00	0.18	0.10	4.64	0.41	6.90	8.20	9.80

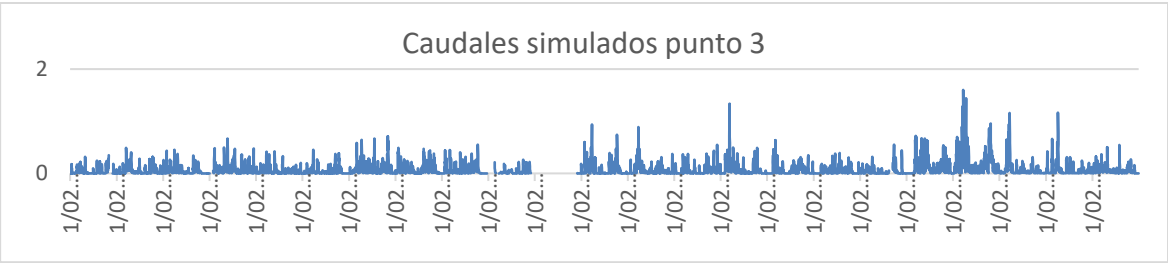


Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
2	Lluvia	Oribatida	Orden	Oribatida	5
		Acariformes	Subclase	Acari	2
		Diptera	Familia	Chironomidae	217
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	471
		Thysanoptera	Orden	Thysanoptera	1
		Coleoptera	Familia	Elmidae	25
		Diptera	Familia	Simuliidae	74
		Araneae	Orden	Araneae	1
		Blattodea	Orden	Blattodea	1
		Lepidoptera	Orden	Lepidoptera	1
		Tricoptera	Familia	Helicopsychidae	2
		Diptera	Familia	Limoniidae	1
		Tricoptera	Familia	Phygadeuonidae	3
		Nematoda	Phylum	Nematoda	139
		Ephemeroptera	Familia	Leptophlebiidae	5
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	6
	Seca	Acariformes	Subclase	Acari	8
		Diptera	Familia	Chironomidae	96
		Amphipoda	Orden	Amphipoda	8
		Diptera	Familia	Simuliidae	16
		Ephemeroptera	Familia	Leptophlebiidae	28
		Coleoptera	Familia	Elmidae	32
		Blattodea	Orden	Blattodea	4
		Hirudinea	Clase	Hirudinea	4
		Tricoptera	Familia	Ecnomidae	12
		Sphaeriida	Familia	Sphaeriidae	4

### PUNTO 3

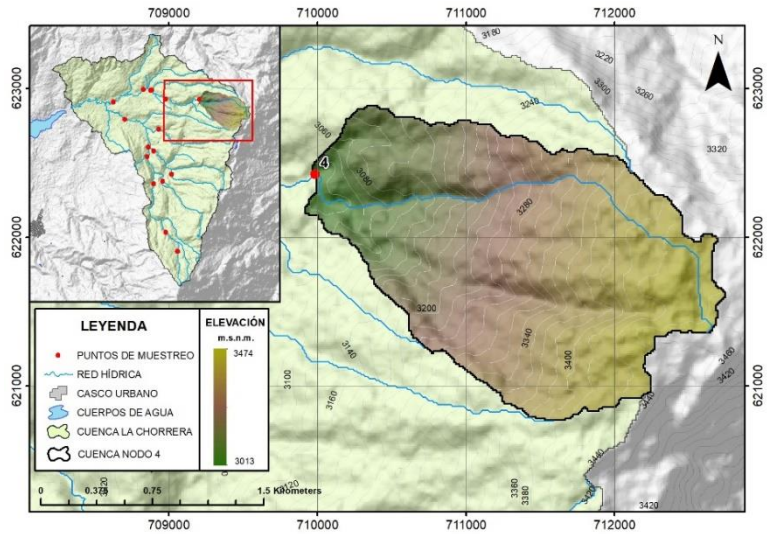


PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O2	DQO mg/L O2	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m3/S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP Cº
3	Humeda	4.00	25.00	14.00	10.10	0.01	170.00	49.00	0.86	0.49	7.42	0.68	6.74	6.43	11.60
	Seca	8.00	23.00	5.00	8.68	0.03	14.00	4.00	0.20	0.05	4.69	0.46	6.65	10.10	11.00



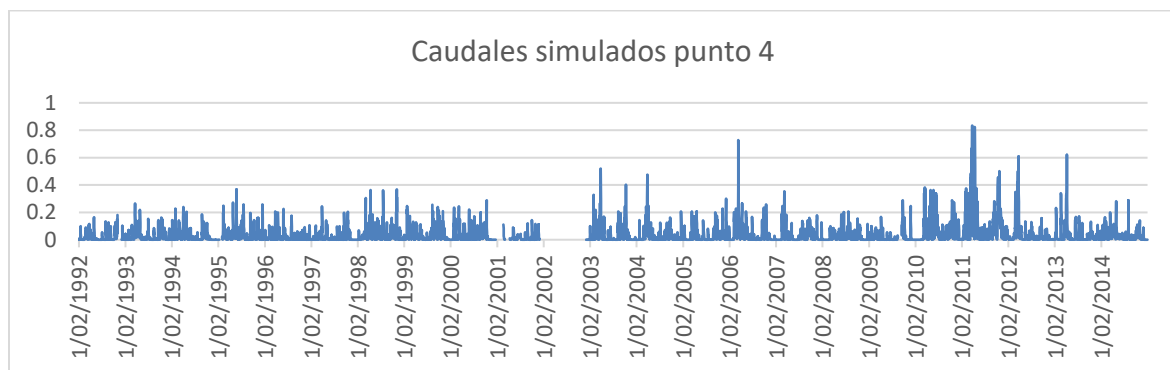
Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
3	Lluvia	Diptera	Familia	Chironomidae	144
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	100
		Diptera	Familia	Simuliidae	16
		Annelida	Subclase	Hirudinea	4
		Hemiptera	Familia	Corixidae	4
		Tricoptera	Familia	Hydropsychidae	4
		Tricoptera	Morfoespecie	Tricoptera_sp1	24
		Ephemeroptera	Familia	Leptophlebiidae	12
	Seca	Diptera	Familia	Ceratopogonidae	24
		Acariformes	Subclase	Acari	4
		Diptera	Familia	Chironomidae	172
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	60
		Sphaeriida	Familia	Sphaeriidae	8
		Hirudinea	Clase	Hirudinea	4
		Tricoptera	Familia	Phygaenidae	12
		Tricoptera	Familia	Hydroptilidae	4
		Ephemeroptera	Familia	Leptophlebiidae	4
		Nematoda	Phylum	Nematoda	4
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	4

PUNTO 4



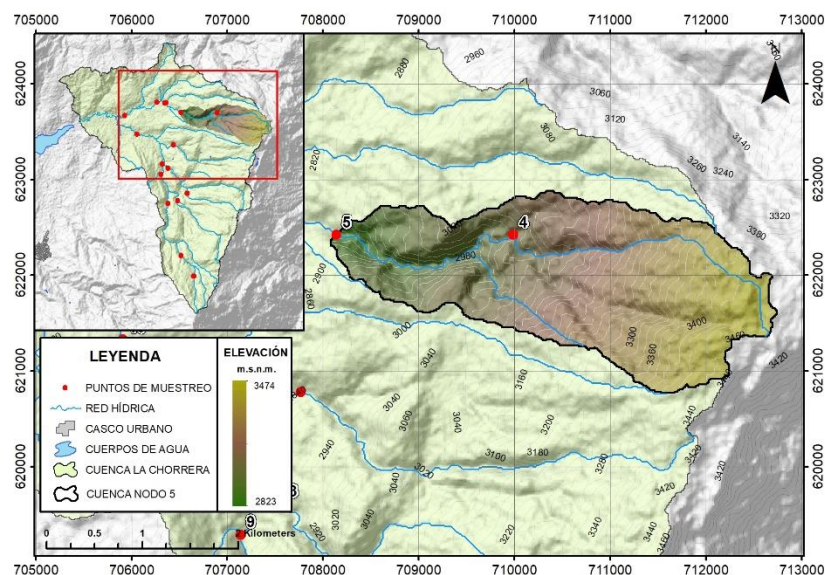


PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O <sub>2</sub>	DQO mg/L O <sub>2</sub>	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m <sup>3</sup> /S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP C°
4	Humeda	2.00	8.00	17.00	12.90	0.01	1.79	1.79	0.22	0.16	7.38	0.69	5.28	5.37	7.73
	Seca	0.01	0.49	10.00	3.36	0.01	33.00	23.00	0.03	0.01	4.55	0.43	7.33	6.47	11.87



Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
4	Seca	Diptera	Familia	Chironomidae	364
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	4
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	12
	Lluvia	Oribatida	Orden	Oribatida	4
		Diptera	Familia	Chironomidae	48
		Himenoptera	Familia	Formicidae	4
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	8

## PUNTO 5

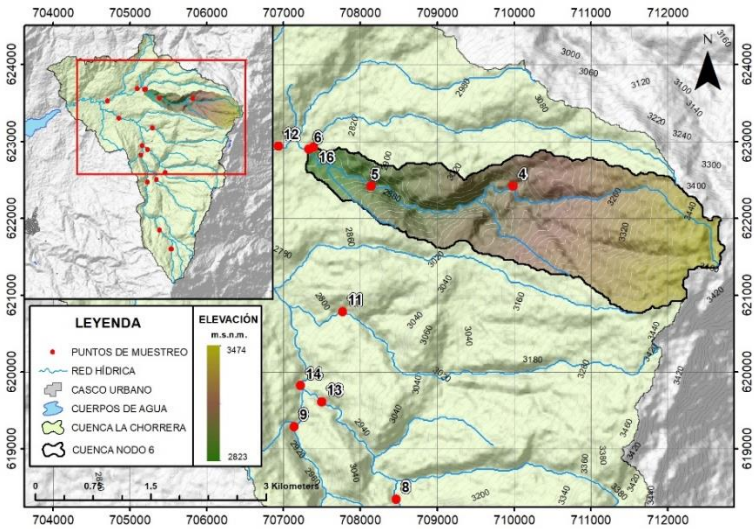


PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O2	DQO mg/L O2	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m3/S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP Cº
5	Humeda	3.00	9.00	17.00	2.00	0.01	1.79	1.79	0.51	0.33	7.29	0.70	6.10	9.53	12.83
	Seca	0.01	0.49	5.00	5.60	0.21	33.00	2.00	0.21	0.08	50.90	49.27	6.40	12.13	13.03

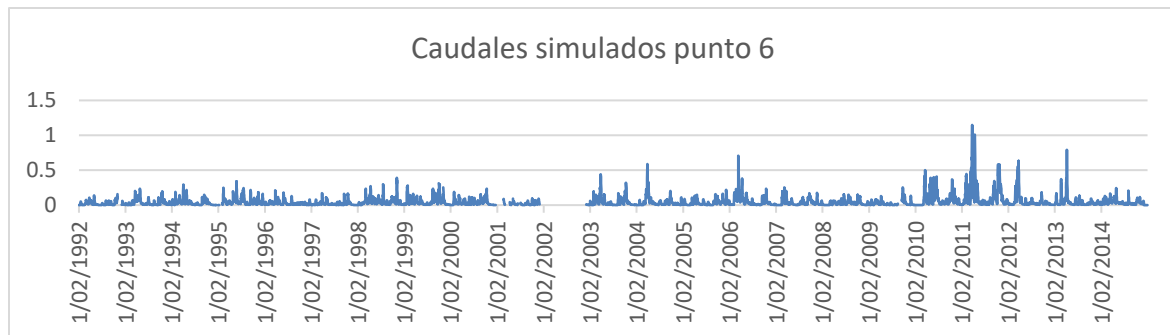


Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
5	Seca	Oribatida	Orden	Oribatida	8
		Acariformes	Subclase	Acari	8
		Diptera	Familia	Chironomidae	120
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	36
		Diptera	Familia	Simuliidae	20
		Tricoptera	Familia	Hydroptilidae	4
		Nematoda	Phylum	Nematoda	8
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	12
	Lluvia	Oribatida	Orden	Oribatida	4
		Acariformes	Subclase	Acari	4
		Diptera	Familia	Chironomidae	32
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	20
		Hemiptera	Familia	Gerridae	8
		Diptera	Familia	Blephaeridae	4
		Diptera	Familia	Simuliidae	68

PUNTO 6

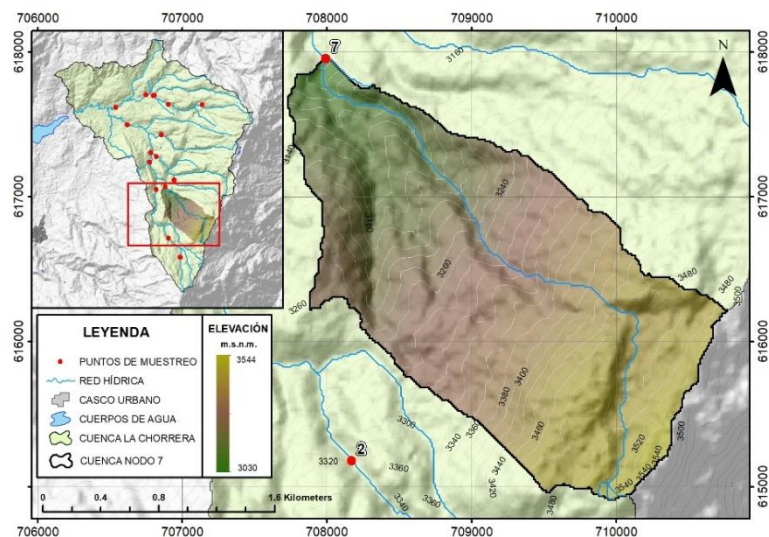


PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O <sub>2</sub>	DQO mg/L O <sub>2</sub>	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m <sup>3</sup> /S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP C°
6	Humeda	4.00	17.00	13.00	9.20	0.01	110.00	110.00	0.50	0.22	7.15	0.68	6.34	12.37	13.10
	Seca	0.01	0.49	10.00	5.60	0.14	9200.00	5400.00	0.41	0.08	5.10	0.49	5.85	21.73	12.93



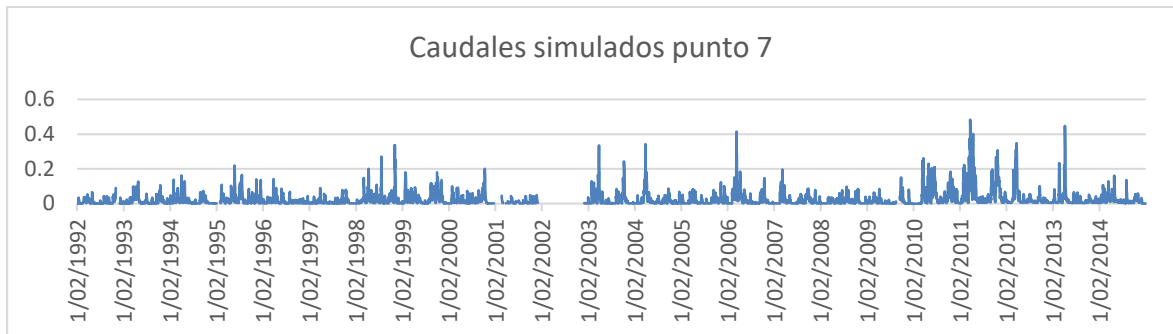
Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
6	Seca	Diptera	Familia	Chironomidae	240
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	16
		Diptera	Familia	Simuliidae	8
		Collembola	Familia	Entomobryidae	12
	Lluvia	Oribatida	Orden	Oribatida	40
		Diptera	Familia	Chironomidae	112
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	240
		Himenoptera	Familia	Formicidae	80
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	104
		Diptera	Familia	Simuliidae	32
		Nematoda	Phylum	Nematoda	32

## PUNTO 7



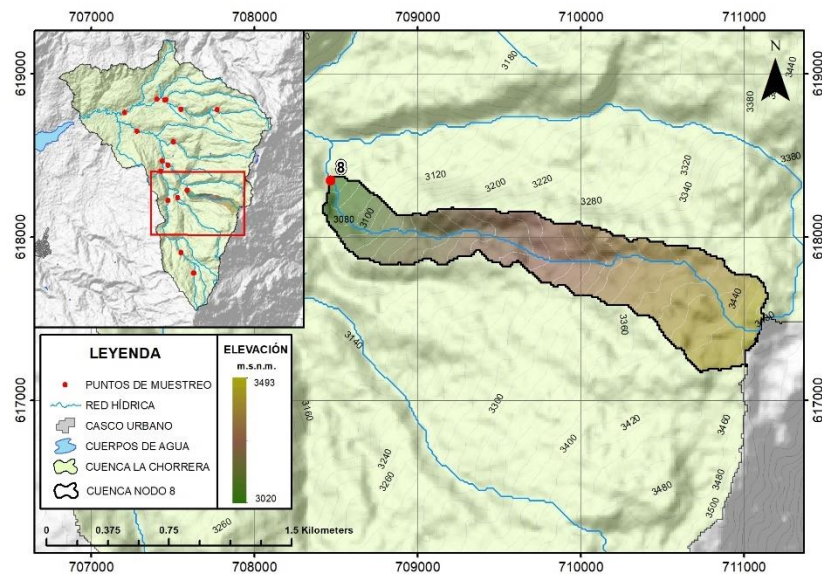


PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O <sub>2</sub>	DQO mg/L O <sub>2</sub>	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m <sup>3</sup> /S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP C°
7	Humeda	6.00	18.00	11.00	3.90	0.01	2.00	2.00	0.35	0.22	7.55	0.68	6.30	5.77	10.50
	Seca	6.00	18.00	17.00	2.20	0.01	7.80	4.50	0.30	0.06	4.74	0.45	5.99	3.87	12.20

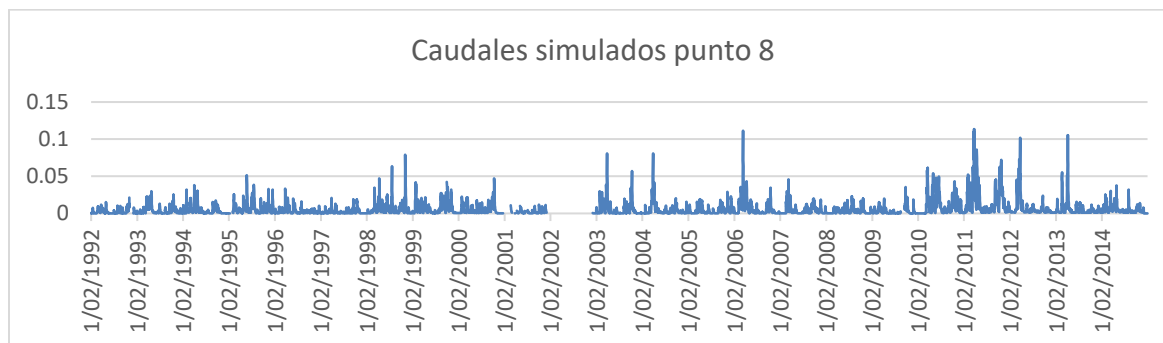


Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
7	Seca	Diptera	Familia	Chironomidae	12
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	4
		Diptera	Familia	Simuliidae	28
		Tricoptera	Familia	Helycopsychidae	12
	Lluvia	Oribatida	Orden	Oribatida	4
		Acariformes	Subclase	Acari	4
		Diptera	Familia	Chironomidae	136
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	16
		Coleoptera	Familia	Elmidae	12
		Diptera	Familia	Simuliidae	20
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	52
		Tricoptera	Morfoespecie	Tricoptera_sp1	48
		Tricoptera	Familia	Hydropsychidae	60
		Tricoptera	Familia	Helycopsychidae	24

## PUNTO 8

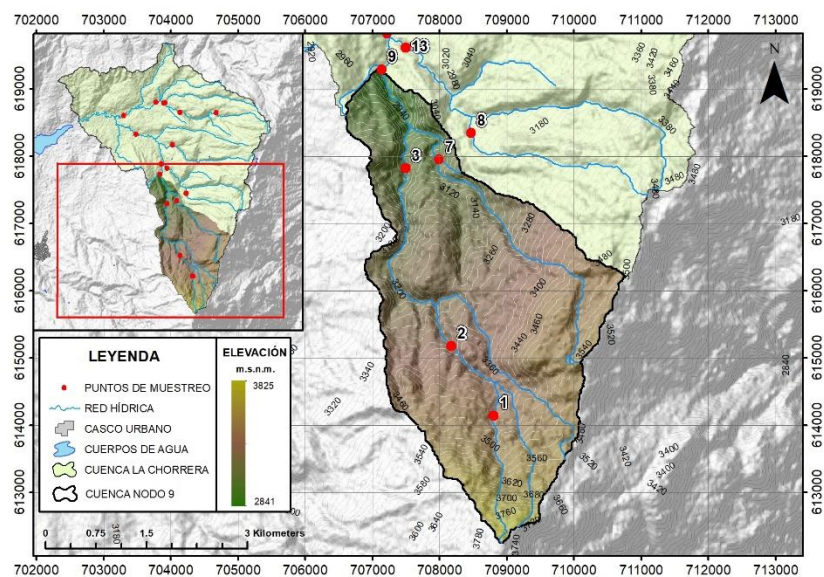


PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O <sub>2</sub>	DQO mg/L O <sub>2</sub>	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m <sup>3</sup> /S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP C°
8	Humeda	1.90	0.49	8.00	5.30	0.01	1.79	1.79	0.28	0.16	7.39	0.68	5.83	6.63	11.50
	Seca	8.00	16.00	16.00	8.96	0.01	1.79	1.79	0.12	0.04	4.49	0.43	5.56	6.90	13.20

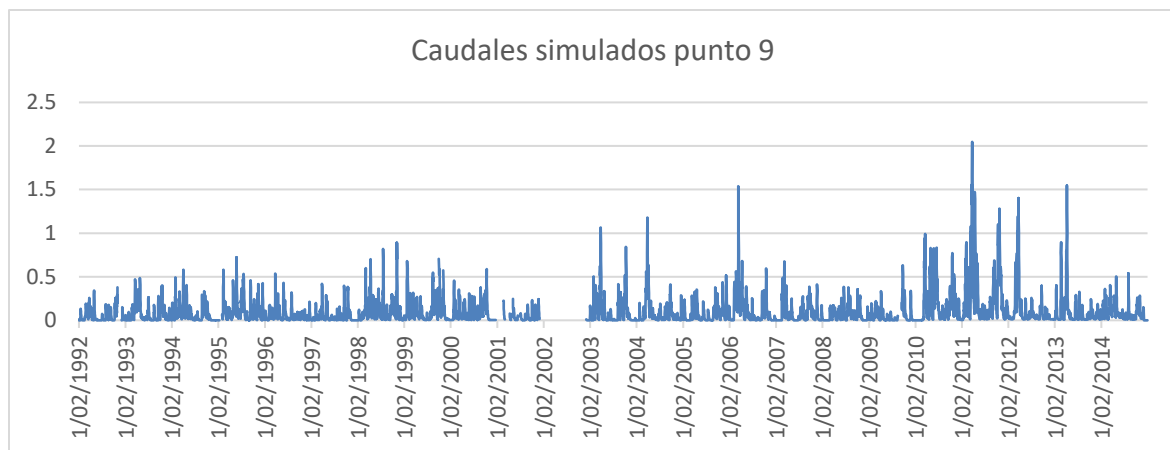


Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
8	Seca	Oribatida	Orden	Oribatida	4
		Diptera	Familia	Chironomidae	168
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	32
		Diptera	Familia	Simuliidae	12
		Tricoptera	Familia	Ecnomidae	4
		Tricoptera	Familia	Hydropsychidae	8
		Tricoptera	Familia	Hydroptilidae	8
	Lluvia	Oribatida	Orden	Oribatida	4
		Acariformes	Subclase	Acari	12
		Diptera	Familia	Chironomidae	348
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	100
		Tricoptera	Morfoespecie	Tricoptera_sp1	120
		Araneae	Orden	Araneae	4
		Ephemeroptera	Familia	Leptophlebiidae	24
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	36
		Coleoptera	Familia	Elmidae	28
		Tricoptera	Familia	Helycopsychidae	8
		Tricoptera	Familia	Ecnomidae	32

## PUNTO 9

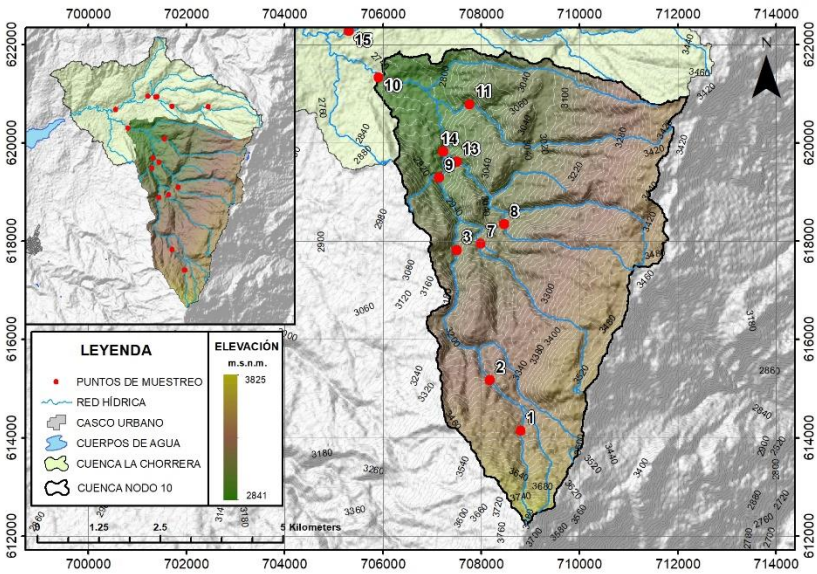


PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O <sub>2</sub>	DQO mg/L O <sub>2</sub>	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m <sup>3</sup> /S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP C°
9	Humeda	1.90	0.49	11.00	2.00	0.01	49.00	33.00	0.52	0.44	7.18	0.68	6.67	9.43	12.20
	Seca	7.00	19.00	13.00	3.36	0.05	22.00	4.50	0.25	0.10	3.39		6.01	118.8	15.00

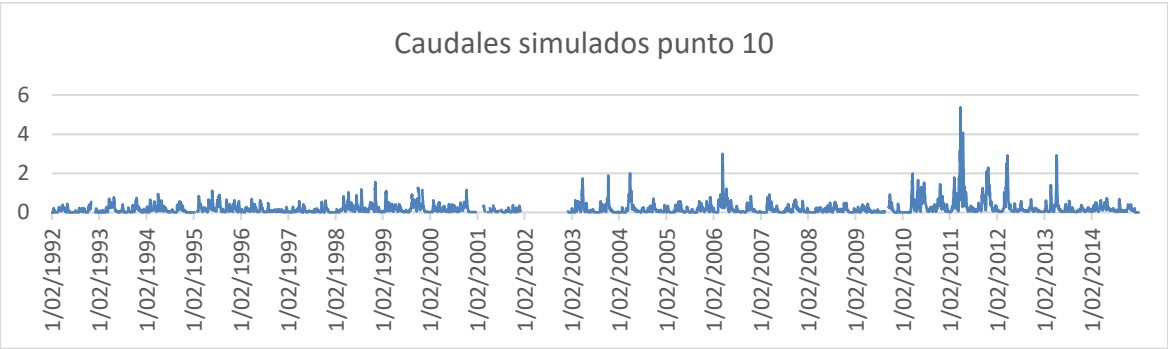


Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
9	Seca	Oribatida	Orden	Oribatida	4
		Diptera	Familia	Chironomidae	216
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	12
		Amphipoda	Orden	Amphipoda	24
		Diptera	Familia	Simuliidae	72
		Thysanoptera	Orden	Thysanoptera	4
		Tricoptera	Familia	Branchyacetidae	24
		Nematoda	Phylum	Nematoda	12
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	20
	Lluvia	Diptera	Familia	Chironomidae	384
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	56
		Diptera	Familia	Simuliidae	48
		Hemiptera	Familia	Corixidae	20
		Diptera	Familia	Limoniidae	12
		Tricoptera	Familia	Hydroptilidae	12
		Tricoptera	Familia	Ecnomidae	8
		Tricoptera	Morfoespecie	Tricoptera_sp1	24
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	192

PUNTO 10



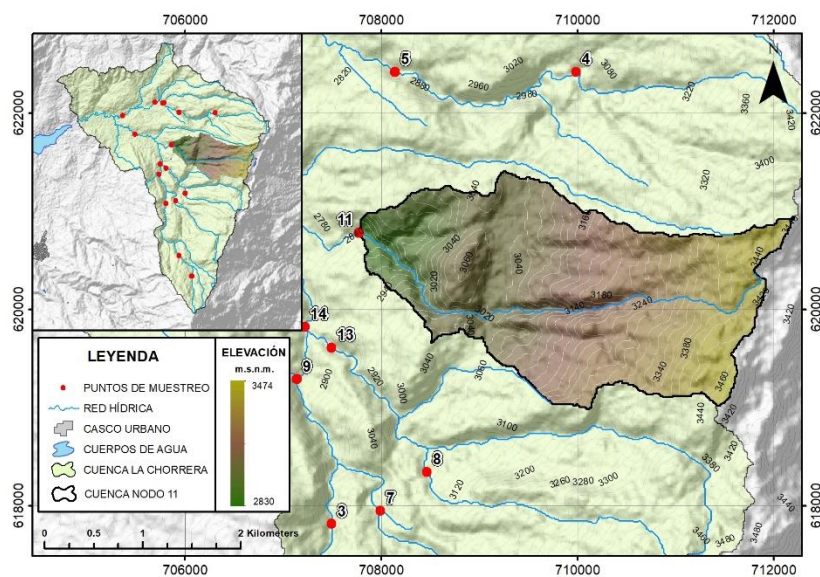
PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O2	DQO mg/L O2	SOLIDOS SUSPENDIDOS S TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m3/S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. µS	TEMP Cº
10	Humeda	5.00	18.00	13.00	3.10	0.01	540.00	350.00	0.61	0.43	6.94	0.68	6.70	12.23	13.80
	Seca	5.00	23.00	0.49	3.92	0.07	2400.00	490.00	0.28	0.21	4.24	0.40	6.71	30.33	12.87



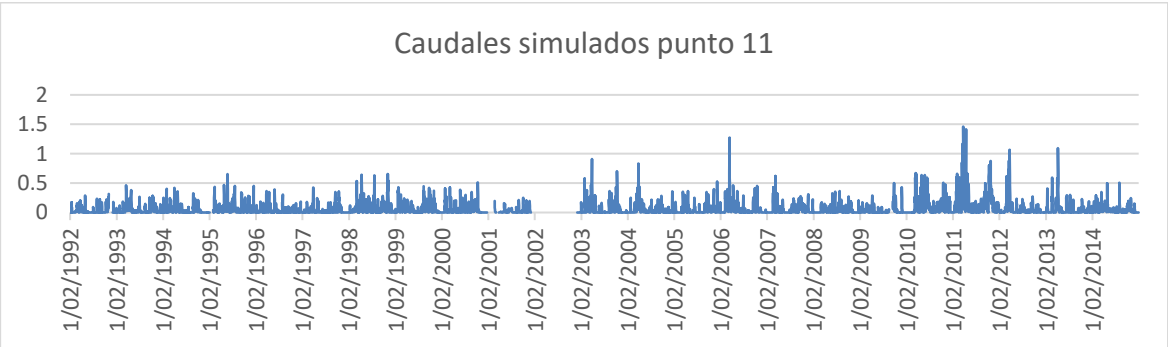


Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
10	Seca	Acariformes	Subclase	Acari	28
		Diptera	Familia	Chironomidae	228
		Coleoptera	Familia	Elmidae	4
		Amphipoda	Orden	Amphipoda	128
		Diptera	Familia	Simuliidae	80
		Tricoptera	Familia	Hydroptilidae	84
		Tricoptera	Familia	Hydropsychidae	20
	Lluvia	Oribatida	Orden	Oribatida	8
		Diptera	Familia	Chironomidae	376
		Diptera	Familia	Simuliidae	372
		Sphaeriida	Familia	Sphaeriidae	4
		Tricoptera	Familia	Ecnomidae	16
		Tricoptera	Familia	Hydropsychidae	4
		Tricoptera	Familia	Hydroptilidae	76
		Nematoda	Phylum	Nematoda	4
		Ephemeroptera	Familia	Leptophlebiidae	8
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	36
		Hemiptera	Familia	Corixidae	4

## PUNTO 11

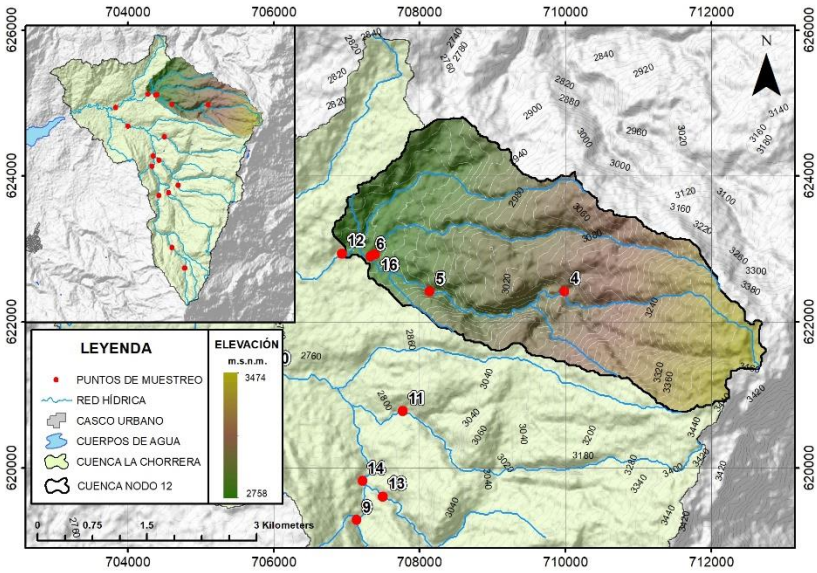


PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O <sub>2</sub>	DQO mg/L O <sub>2</sub>	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/LN	FOSFORO TOTAL mg/LP	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m <sup>3</sup> /S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP C°
11	Humeda	1.90	0.49	12.00	4.20	0.01	11.00	4.50	0.71	0.32		0.66	6.49	14.17	12.70
	Seca	4.00	16.00	10.00	4.48	0.18	4.50	2.00	0.31	0.11	3.52	0.34	7.27	17.57	12.63

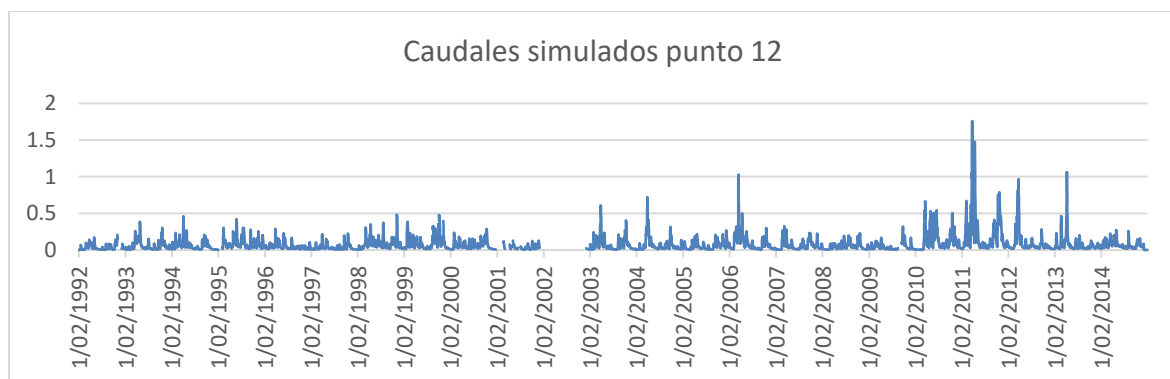


Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
11	Seca	Acariformes	Subclase	Acari	8
		Diptera	Familia	Chironomidae	412
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	68
		Amphipoda	Orden	Amphipoda	12
		Diptera	Familia	Simuliidae	220
		Tricoptera	Morfoespecie	Tricoptera_sp1	12
		Nematoda	Phylum	Nematoda	20
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	20
	Lluvia	Acariformes	Subclase	Acari	4
		Diptera	Familia	Chironomidae	124
		Hemiptera	Familia	Corixidae	28
		Diptera	Familia	Simuliidae	328
		Tricoptera	Morfoespecie	Tricoptera_sp1	12
		Nematoda	Phylum	Nematoda	20
		Diptera	Familia	Limoniidae	4

PUNTO 12



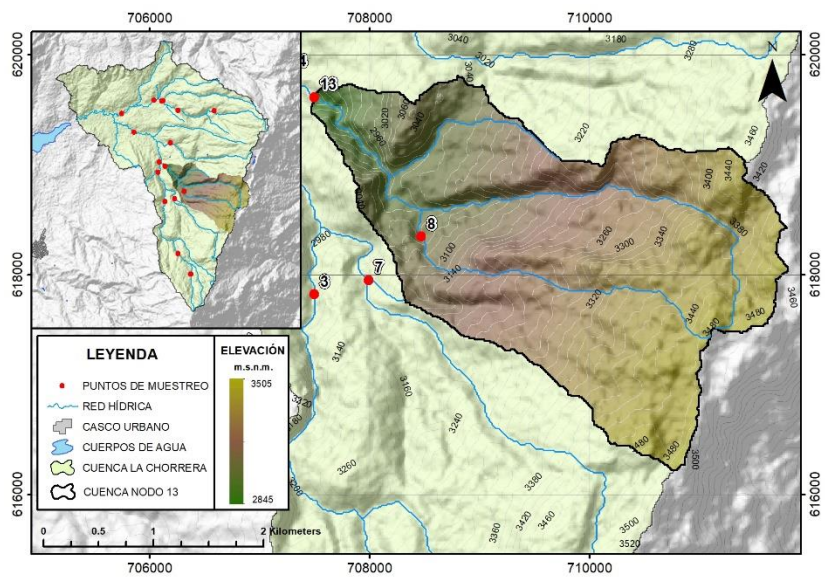
PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O <sub>2</sub>	DQO mg/L O <sub>2</sub>	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m <sup>3</sup> /S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP C°
12	Humeda	5.00	17.00	135.00	3.90	0.01	350.00	79.00	0.19	0.15	6.99	0.68	6.58	22.40	13.60
	Seca	6.00	10.00	10.00	4.48	0.07	9200.00	3500.00	0.22	0.10	5.18	0.50	6.70	34.40	13.90



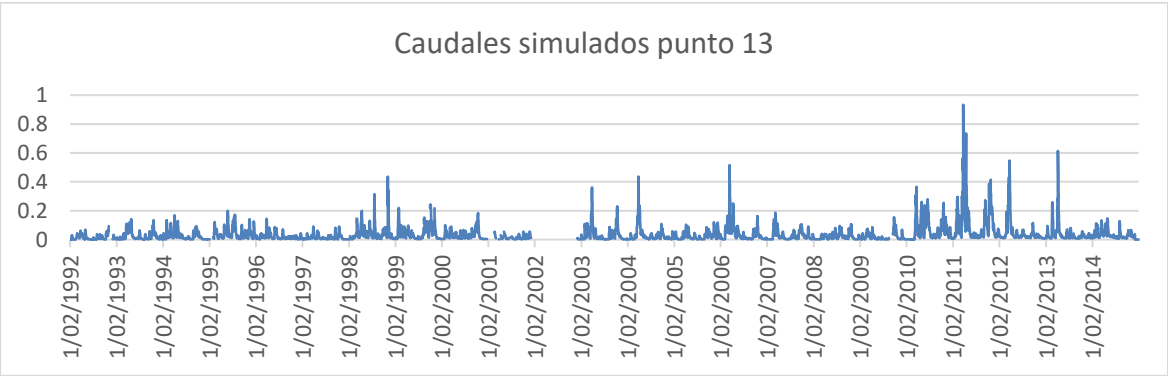
Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
12	Seca	Diptera	Familia	Chironomidae	228
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	28
		Diptera	Familia	Simuliidae	616
		Hirudinea	Clase	Hirudinea	4
		Hemiptera	Familia	Gerridae	8
		Tricoptera	Familia	Hydroptilidae	48
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	4
	Lluvia	Oribatida	Orden	Oribatida	32
		Diptera	Familia	Chironomidae	88
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	76
		Cyclopoidea	Orden	Cyclopoidea	8
		Diptera	Familia	Simuliidae	16
		Himenoptera	Familia	Formicidae	8
		Diptera	Familia	Rhigionidae	4
		Tricoptera	Familia	Hydropsychidae	8
		Spirobolida	Orden	Spirobolida	4
		Hirudinea	Clase	Hirudinea	4
		Thysanoptera	Orden	Thysanoptera	4



PUNTO 13

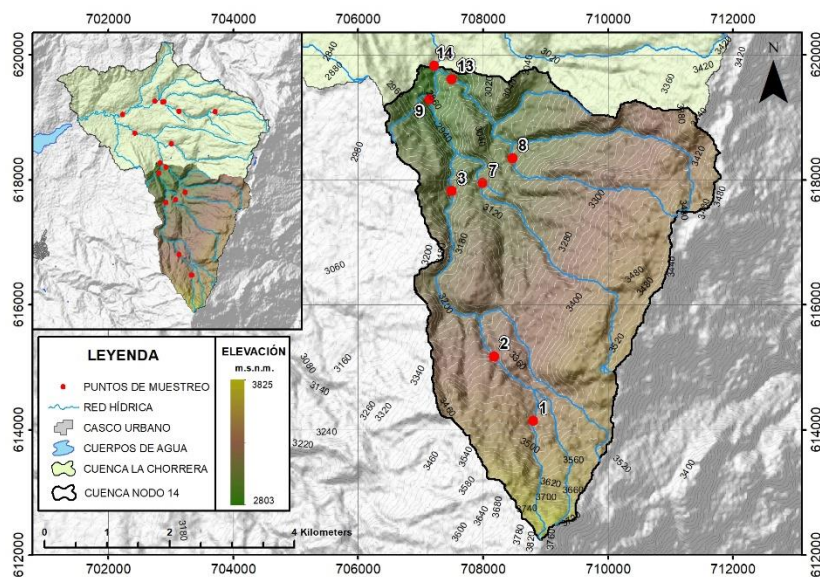


PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O <sub>2</sub>	DQO mg/L O <sub>2</sub>	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m <sup>3</sup> /S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP C°
13	Humeda	4.00	10.00	0.49	2.80	0.01	110.00	78.00	0.65	0.42	6.73		7.13	13.27	12.40
	Seca	1.00	12.00	4.00	1.12	0.01	14.00	4.50	0.39	0.43	4.96	0.48	7.02	13.93	13.23

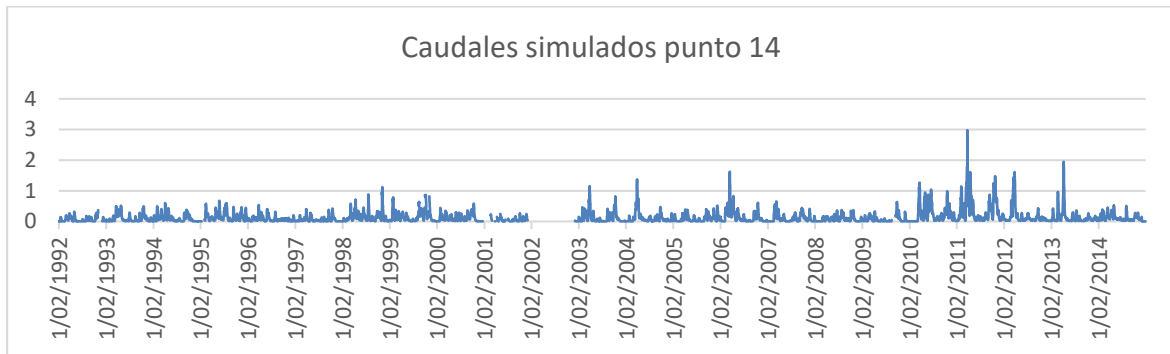


Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomic	Taxa	Abundancia
13	Seca	Diptera	Familia	Chironomidae	456
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	864
		Amphipoda	Orden	Amphipoda	64
		Diptera	Familia	Simuliidae	56
		Sphaeriida	Familia	Sphaeriidae	96
		Tricoptera	Familia	Hydroptilidae	40
		Nematoda	Phylum	Nematoda	28
	Lluvia	Acariformes	Subclase	Acari	4
		Diptera	Familia	Chironomidae	216
		Cyclopodea	Orden	Cyclopoidea	4
		Diptera	Familia	Simuliidae	80
		Tricoptera	Morfoespecie	Tricoptera_sp1	8
		Tricoptera	Familia	Hydroptilidae	4

## PUNTO 14

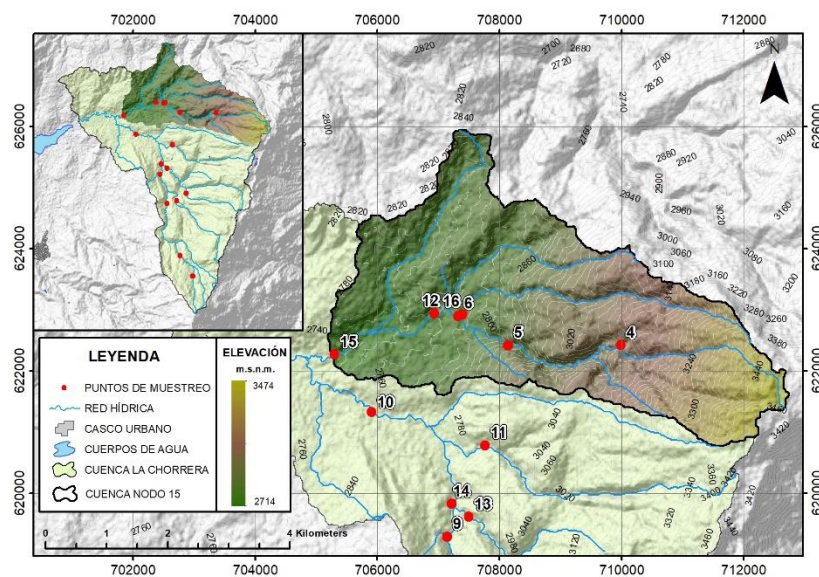


PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O <sub>2</sub>	DQO mg/L O <sub>2</sub>	SOLIDOS SUSPENDIDO S TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m <sup>3</sup> /S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP C°
14	Humeda	8.00	24.00	7.00	4.20	0.01	210.00	110.00	0.14	0.11	7.47		6.71	12.37	12.20
	Seca	5.00	24.00	5.00	3.36	0.05	130.00	9.30	0.23	0.07	4.53	0.43	7.60	15.53	12.69

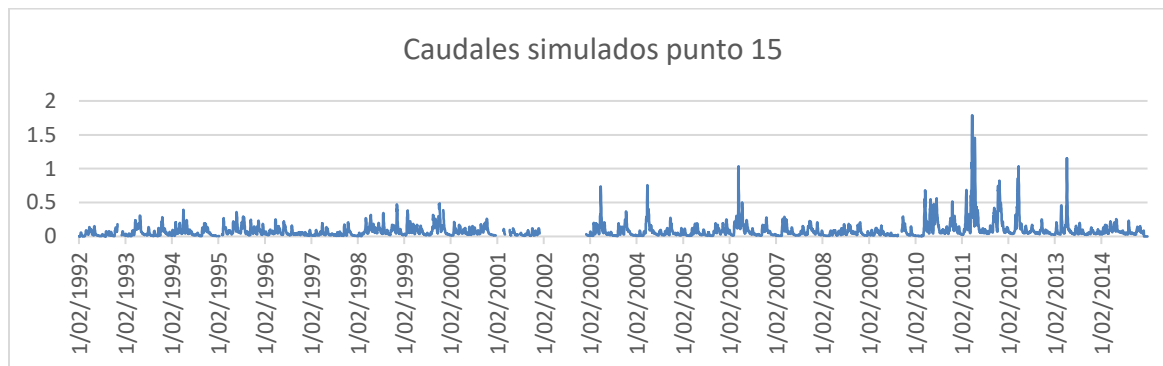


Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
14	Seca	Oribatida	Orden	Oribatida	4
		Acariformes	Subclase	Acari	32
		Diptera	Familia	Chironomidae	288
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	48
		Diptera	Familia	Simuliidae	140
		Hirudinea	Clase	Hirudinea	4
		Tricoptera	Familia	Hydroptilidae	52
		Ephemeroptera	Familia	Leptophlebiidae	4
		Tricoptera	Familia	Hydroptilidae	20
	Lluvia	Acariformes	Subclase	Acari	24
		Diptera	Familia	Chironomidae	360
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	64
		Diptera	Familia	Simuliidae	128
		Tricoptera	Familia	Hydroptilidae	44

## PUNTO 15

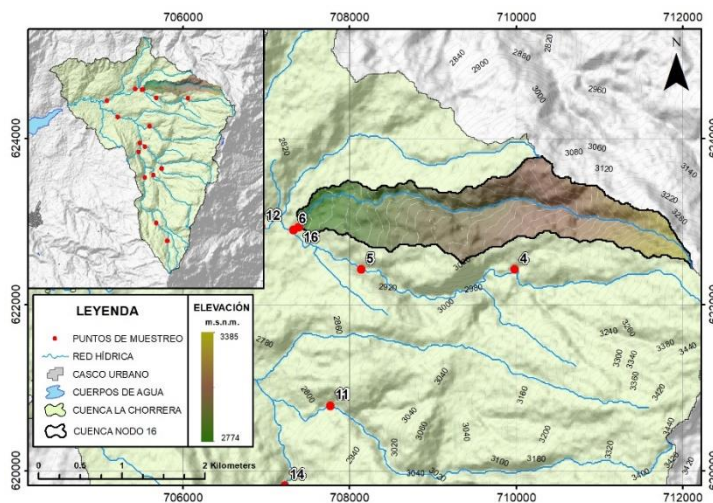


PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O <sub>2</sub>	DQO mg/L O <sub>2</sub>	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m <sup>3</sup> /S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. μS	TEMP C°
15	Humeda	10.00	25.00	12.00	0.29	0.01	2200.00	330.00	0.42	0.19	6.83		6.83	36.27	13.63
	Seca	5.00	10.00	4.48	0.03	9.20	9200.00	5400.00	0.37	0.13	4.84	0.48	6.58	48.33	14.80

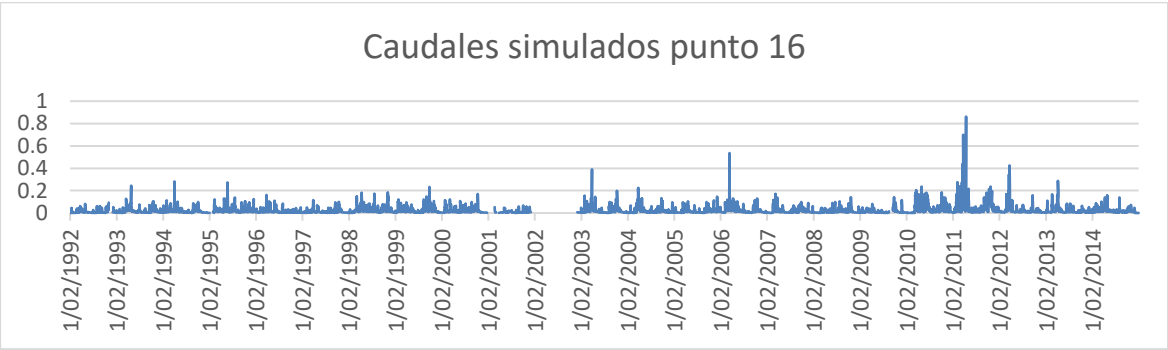


Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
15	Seca	Acariformes	Subclase	Acari	4
		Diptera	Familia	Chironomidae	304
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	28
		Coleoptera	Familia	Grinidae	4
		Diptera	Familia	Simuliidae	56
		Tricoptera	Familia	Hydroptilidae	28
	Lluvia	Diptera	Familia	Chironomidae	128
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	672
		Hemiptera	Familia	Corixidae	8
		Amphipoda	Orden	Amphipoda	24
		Sphaeriida	Familia	Sphaeriidae	32
		Nematoda	Phylum	Nematoda	8

## PUNTO 16



PUNTO	EPOCA	DBO mg/L O2	DQO mg/L O2	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES mg/L	NTK mg/L N	FOSFORO TOTAL mg/L P	COLIFORMES TOTALES nmp/100mL	E. Coli nmp/100mL	VELOCIDAD m/seg	CAUDAL m3/S	OXIGENO DISUELTO mg/L	OXIGENO DISUELTO %	pH	C.E. µS	TEMP Cº
16	Humeda	6.00	19.00	11.00	2.30	0.01	230.00	130.00	0.29	0.06	6.43		6.57	29.01	13.50
	Seca	4.00	6.00	9.00	5.04	0.15	49.00	33.00	0.08	0.03	4.05	0.40	6.29	51.10	14.53



Sitio	Epoca	Orden	Nivel Taxonomico	Taxa	Abundancia
16	Seca	Diptera	Familia	Chironomidae	68
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	136
		Cyclopoida	Orden	Cyclopoidea	8
		Diptera	Familia	Simuliidae	60
		Collembola	Familia	Entomobryidae	24
		Diptera	Familia	Ceratopogonidae	16
	Lluvia	Oribatida	Orden	Oribatida	8
		Diptera	Familia	Chironomidae	504
		Oligochaeta	Subclase	Oligochaeta	408
		Amphipoda	Orden	Amphipoda	24
		Diptera	Familia	Simuliidae	48
		Hirudinea	Clase	Hirudinea	8
		Diptera	Familia	Diadocidae	8

## C. Caudales Simulados VS Caudales Observados

